



Contribution à une structure de gestion en temps réel de cellule flexible de production

Patrick Conesa

► To cite this version:

Patrick Conesa. Contribution à une structure de gestion en temps réel de cellule flexible de production. Modélisation et simulation. Université Claude Bernard - Lyon I, 1991. Français. NNT : 1991LYO10034 . tel-00850334

HAL Id: tel-00850334

<https://theses.hal.science/tel-00850334>

Submitted on 6 Aug 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

présentée

devant l'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I

pour l'obtention

du DIPLOME DE DOCTORAT

par

Patrick CONESA

**Contribution à une structure de
gestion en temps réel
de cellule flexible de production.**

Simulation et méthodologie d'évaluation.

Soutenue le 17 Avril 1991

JURY : Mr J. SAU (Rapporteur)
Mr P. LADET (Rapporteur)
Mr J. DINNET (Directeur de recherche)
Mr A. MATHON
Mr H. AUFFRANC
Mr H. CAZALET

THESE

présentée

devant l'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I

pour l'obtention

du DIPLOME DE DOCTORAT

par

Patrick CONESA

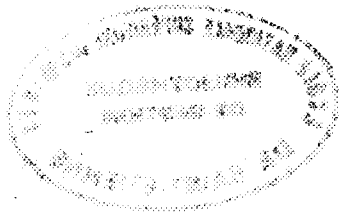
**Contribution à une structure de
gestion en temps réel
de cellule flexible de production.**

Simulation et méthodologie d'évaluation.



Soutenue le 17 Avril 1991

JURY : Mr J. SAU (Rapporteur)
Mr P. LADET (Rapporteur)
Mr J. DIMNET (Directeur de recherche)
Mr A. MATHON
Mr M. AUFFRANC
Mr M. CAZALET



UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I

Président de l'Université
1er Vice-Président Fédération Santé
1er Vice-Président Fédération Sciences
Président du Comité de Coordination
des Etudes Médicales
Secrétaire Général

M. le Professeur P. ZECH
M. le Professeur L.M. PATRICOT
M. Le Professeur UZAN

M. le Professeur P. ZECH
M. F. MARIANI

FEDERATION SANTE

- UFR de Médecine GRANGE-BLANCHE
- UFR de Médecine ALEXIS-CARREL
- UFR de Médecine LYON-NORD
- UFR de Médecine LYON-SUD
- Institut des Sciences Biologiques
et Pharmaceutiques
- UFR d'ODONTOLOGIE
- INSTITUT DES TECHNIQUES DE
READAPTATION
- Département de BIOLOGIE HUMAINE
- Département d'INNOVATION ET DE
COORDINATION PEDAGOGIQUE

Directeur : Mme le Pr. PELLET
Directeur : M. le Pr. EVREUX
Directeur : M. le Pr. PATRICOT
Directeur : M. le Pr. DEJOUR
Directeur : M. le Pr. VILLARD

Directeur : M. le Pr. MAGLOIRE
Directeur : M. le Pr. EYSSETTE

Directeur : M. le Pr. BRYON
Directeur : M. le Pr. LLORCA

FEDERATION SCIENCES

- Institut DES SCIENCES DE LA MATIERE
- Institut DES SCIENCES DE L'INGE-
NIEURIE ET DU DEVELOPPEMENT
TECHNOLOGIQUES
- Institut DE CHIMIE ET BIOLOGIE
- Institut d'ANALYSE DES SYSTEMES
BIOLOGIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES
- Institut DES SCIENCES DE LA TERRE
DE L'OCEAN, DE L'ATMOSPHERE, DE
L'ESPACE ET DE L'ENVIRONNEMENT
- UFR des ACTIVITES PHYSIQUES ET
SPORTIVES
- I.U.T. A
- I.U.T. B
- Département de 1er Cycle
pluridisciplinaire Sciences
- Département de 2ème Cycle
 - Sciences de la Vie et de la
Terre
 - Sciences pour l'Ingénieur
 - Sciences de l'Analyse et de
la Matière

Directeur : M. le Pr. ELBAZ
Directeur : M. le Pr. FONTAINE

Directeur : Mme VARAGNAT, M.C.
Directeur : M. le Pr. LEGAY

Directeur : M. le Pr. ELMI

Directeur : M. le Pr. CAMY

Directeur : M. le Pr. GIELLY
Directeur : M. le Pr. PIVOT
Directeur : M. PONCET, M.C.

Directeur : M. le Pr. BLANCHET
Directeur : M. le Pr. BETHOUX

Directeur : M. le Pr. VIALLE

A mes proches,

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE, souhaitée par la société RAMSES, en accord avec le laboratoire Stratégie du Développement de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur SAU, Professeur à l'Université Claude Bernard LYON I, et Monsieur LADET, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, pour leur disponibilité et l'honneur qu'ils m'accordent en tant que rapporteurs de ces travaux.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude envers Monsieur DIMNET, Professeur à l'Université Claude Bernard LYON I, pour la confiance qu'il a su m'accorder tout au long de ma formation universitaire.

Je remercie toute l'équipe de Monsieur MATHON, Directeur du laboratoire Stratégie du Développement de l'école Supérieure des Mines de Saint-Etienne. Je souhaite que ce contrat CIFRE puisse compléter favorablement leurs connaissances des systèmes modernes de production.

Que toutes les personnes de la société RAMSES, Monsieur AUFFRANC Président Directeur Général, qui m'ont donné les moyens d'arriver aux termes de ces recherches dans un cadre industriel, trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

La présence, au sein du jury, de Monsieur CAZALET, ingénieur du GIAT à Saint-Etienne, justifie le caractère appliqué de ces travaux. Je tiens tout particulièrement à le remercier pour sa disponibilité à exploiter et maintenir le logiciel POLIMAS* en milieu industriel.

POLIMAS : Application de simulation et pilotage d'une cellule de production dérivant du logiciel SIMULFLEX présenté dans ces travaux.

Table des Matières

Chapitre 1	LA CELLULE FLEXIBLE DE PRODUCTION	19
1.1	GENERALITES	19
1.1.1	Méthodes de constitution de cellules de production	20
1.1.2	Notion de machines virtuelles	20
1.2	COMPOSANTES PHYSIQUES	22
1.2.1	Production	23
	Typologie	23
	Modèles de processus de transformation	24
1.2.2	Manutention	26
	Le transport par convoyeur	26
	Le transport libre	28
1.2.3	Stockage	29
1.2.4	Ressources annexes de production	32
	Ressources affectées aux machines	33
	Ressources affectées aux produits	35
1.2.5	Récapitulatif	36
1.3	COMPOSANTES INFORMATIONNELLES	37
1.3.1	Informations techniques	38
1.3.2	Informations de gestion	39
1.3.3	Centres d'information	42
1.3.4	Éléments de pilotage	45
	Les concepts	45
	Principaux constituants	47
	Solutions de conduite	50
1.4	COMPOSANTES DECISIONNELLES	51
1.4.1	Cadre conceptuel	51
	Décisions à long et moyen termes	53
	Nature des décisions temps réel	54
	Définition d'un centre de décision	56
1.4.2	Le centre de décision "PILOTE"	58
	Composition des contextes de décision	60
	Variables de performances	61
	Ressources supports	62
1.5	GESTION DES PRODUITS	63
1.6	GESTION DES POSTES DE TRAVAIL	64
1.7	GESTION DES RESSOURCES ANNEXES	65
1.7.1	Ressources liées aux produits	66
1.7.2	Ressources liées aux machines	66
	Programmes pièces	67
	Les outils	67
	Opérateurs exécutants	69
1.8	GESTION DU TRANSPORT	69
	Exemple introductif	69

L'ensemble instantané des déplacements E_t	71
Réduction/Extension de E_t^0	71
Allocation par niveaux d'actions prioritaires	72
Allocation selon optimum	74
1.9 DECISIONS COMPLEMENTAIRES	81
1.10 CONCLUSION	82
 Chapitre 2 SIMULATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION MANUFACTURIERS	85
2.1 INTRODUCTION	85
2.2 MODELISATION	90
2.3 "ETAT DE L'ART" EN SIMULATION	97
2.3.1 Méthodes analytiques	97
2.3.2 Méthodes formelles : les réseaux de PETRI	97
2.3.3 Langages de simulation généraux	98
2.3.4 Simulation dédiée	99
2.3.5 Utilisation de l'intelligence artificielle	100
2.3.6 Résumé	100
2.4 SIMULATION ET DECISION	101
2.5 L'APPLICATION SIMULFLEX	102
2.5.1 Principe général	102
2.5.2 Schéma conceptuel	104
Schéma produit	104
Schéma poste de travail	106
Schéma stockage	108
Schéma transport	110
2.5.3 Algorithmes de principe	111
2.5.4 Architecture logicielle	113
2.5.5 Traitement des décisions	115
2.6 CONCLUSION	116
 Chapitre 3 METHODOLOGIE D'EVALUATION DES REGLES DE DECISION	119
3.1 INTRODUCTION	119
3.2 BANC TEST	119
3.2.1 Structure de la cellule	119
3.2.2 Production de la cellule	121
3.3 NOMENCLATURE DES SIMULATIONS	123
3.4 VARIABLES DE MESURE DES PERFORMANCES	127
3.5 CONSTITUTION D'UNE METHODE D'ANALYSE DES RESULTATS	128
3.5.1 La méthode ACP	128
3.5.2 Analyse des graphiques	134
Les centres de gravité secondaires	137
Représentation en étoile	137
3.5.3 Qualification des observations	138
3.5.4 Composition des axes factoriels	138
3.6 PERFORMANCES DE LA CELLULE "IDEALE"	139
3.7 PERFORMANCES EN PRESENCE D'ALEAS	141
3.8 CONCLUSION	143
 Chapitre 4 POLITIQUES DE PILOTAGE	145
4.1 PILOTAGE SANS CONTRAINTE DE GESTION	145
4.2 ORDONNANCEMENT DU LANCEMENT	146

4.3	SUIVI D'UN ORDONNANCEMENT DIFFERE	147
4.4	PILOTAGE SOUS CONTRAINTES DE GESTION	147
	Règles locales de gestion	147
	Ordonnancement temps réel	147
	Intégration de la simulation	148
4.5	PILOTAGE ASSISTE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE .	149
4.6	CONCLUSION	152
Chapitre 5 CONCLUSION		155
Annexe A RAPPELS DE GESTION DE PRODUCTION		159
A.1	Modèles de production	159
A.2	Règle de sélection de pièces dans une file d'attente	160
	Règle de gestion	160
	Contrainte de gestion	160
A.3	Méthodes de gestion de production	160
Annexe B REGLES LOCALES DE GESTION		163
Annexe C DESCRIPTION TECHNIQUE LOGICIEL SIMULFLEX		167
C.1	Introduction	167
C.2	Principe de fonctionnement	168
C.3	Fonctionnalités de SIMULFLEX	169
	Les équipements de production	169
	Les règles de gestion	172
	Pannes et réparations	173
	Les produits et le plan de fabrication	174
	Quelques fonctions complémentaires	175
C.4	L'introduction des données	176
C.5	La simulation	178
	Suivi de la simulation	179
	Les fichiers	180
	Conditions de fin de simulation	180
C.6	Les résultats	181
BIBLIOGRAPHIE		183
GLOSSAIRE		191

Figures

Figure 1.1: Modèle GRAI	19
Figure 1.2: Organisation en machines virtuelles	21
Figure 1.3: Convoyeur en ligne	26
Figure 1.4: Convoyeur en boucle	27
Figure 1.5: Convoyeur multiple	27
Figure 1.6: Cellule avec un seul transporteur	28
Figure 1.7: Cellule avec réseau de transports libres (HAMM-87)	29
Figure 1.8: Stockage inter-opérateur	30
Figure 1.9: Exemples de stockage tampon	31
Figure 1.10: Exemples de stockage commun	32
Figure 1.11: Exemples de stockage d'outils (WARN-86)	34
Figure 1.12: Configurations stockage d'outils	35
Figure 1.13: Schéma de principe interface machine/produit	36
Figure 1.14: Informations de gestion temps réel	40
Figure 1.15: Composition d'un centre d'information	43
Figure 1.16: Relations entre niveaux hiérarchiques (NUSS-86)	46
Figure 1.17: Concepts de pilotage	47
Figure 1.18: Conduite d'une ressource	48
Figure 1.19: Modèle décisionnel d'une unité de production (BOUV-86)	52
Figure 1.20: Pilotage & gestion d'un système de transport	80
Figure 2.1: Cycles d'étude de l'adéquation des moyens de production	87
Figure 2.2: Cycles d'étude des performances des moyens de production	88
Figure 2.3: Principe général des réseaux de PETRI	93
Figure 2.4: Modélisation orientée objet	95
Figure 2.5: Relation Evènement/Activité/Processus	98
Figure 2.6: L'offre en simulation	101
Figure 2.7: Contexte de simulation	103
Figure 2.8: Schéma produit	105
Figure 2.9: schéma machine	107
Figure 2.10: Schéma emplacement de stockage	109
Figure 2.11: Schéma d'un moyen de transport	110
Figure 2.12: Algorithme principal de simulation	111
Figure 2.13: Génération d'événements à l'instant t_i	113
Figure 3.1: Plan d'implantation cellule	120
Figure 3.2: Cycle d'aide à la décision	144
Figure 4.1: Schéma de principe l'application DELFI-2	150
Figure 4.2: Schéma général de MPECS	152
Figure A.1: Gestion de production Type MRP	161
Figure C.1: SIMULFLEX : principe général	168
Figure C.2: SIMULFLEX : modèle de système de production	170

Figure C.3: Schéma de principe interfaces	
machines/produits	171
Figure C.4: Notion de période de fonctionnement	172
Figure C.5: Menu de création des données	177
Figure C.6: Page de définition des postes de travail	177
Figure C.7: Page de saisie du programme de fabrication	178
Figure C.8: Exemple de suivi interactif de la simulation	179

Tableaux

Table 1.1: Correspondance machine réelle/machine virtuelle .	21
Table 1.2: Composantes physiques d'une cellule de production	37
Table 1.3: D01 : Choix d'une pièce, parmi N, au lancement .	64
Table 1.4: D02 : Choix entre N pièces pour charger une machine	64
Table 1.5: D03 : Choix entre N machines pour transformer une pièce	65
Table 1.6: D05 : Choix d'affectation d'une ressource annexe .	66
Table 1.7: Priorités aux actions	73
Table 1.8: D04 : Sélection d'un déplacement parmi N	81
Table 1.9: D1* : Décisions visant le maintien des performances	82
Table 1.10: D2* : Décisions de réactions aux perturbations .	82
Table 2.1: Correspondance logique de changement d'état / modèle d'évaluation	96
Table 3.1: Valeurs de l'anticipation	124
Table 3.2: Règles de choix des pièces	125
Table 3.3: Règles d'allocation du moyen de transport	126
Table 3.4: Matrice de corrélations	130
Table 3.5: Les valeurs propres	130
Table 3.6: Composition des axes factoriels	131
Table 3.7: Pannes et réparations	142
Table C.1: Règles de gestion utilisables par SIMULFLEX . . .	173
Table C.2: Lois de mise en panne et de réparation	174
Table C.3: Exemple de résultats sur les postes de travail .	181
Table C.4: Exemple de résultats pièces réalisées	182
Table C.5: Exemple de résultats pièces réalisées (Suite) .	182

INTRODUCTION

Actuellement, la conception des systèmes de production prend des orientations différentes relativement à l'agrégation des ressources mises en oeuvre.

Les premières réalisations (GIRA-82) ont visé l'automatisation centralisée d'ateliers complets. Ces démarches ont rencontré des difficultés, fréquemment d'ordre technologique, lorsque le nombre de ressources de production mises en oeuvre était excessif : inter-dépendance trop élevée entre les ressources, allocation des moyens complexes, logiciels de commande sophistiqués et peu maintenables, solutions technologiques peu adaptées.

Deux orientations ont été prises en fonction du type de production réalisée.

Dans les applications où les produits ne nécessitent pas de transformations compliquées (ex : laminage (HERI-88), transformation plastique, assemblage) l'automatisation d'ateliers est envisageable, les ressources de production sont pilotées de façon indépendante, le produit circule avec l'équivalent d'une fiche suiveuse, et chaque ressource est apte à décider du devenir du produit se présentant à elle.

Dans d'autres situations (ex : opérations longues et fréquentes de tournage / fraisage), l'industriel est amené à constituer des cellules de production, regroupement de ressources destinées à réaliser une partie des transformations sur les produits. Ces moyens modernes de production intègrent des fonctions annexes telles que transport, stockage, manutention.. Ceci pour mieux tirer profit de l'outil de fabrication. De cette agrégation de moyens résulte la notion de cellule flexible de production.

Nous nous proposons d'étudier, plus particulièrement, la seconde solution pour en définir les moyens de gestion en temps réel associés.

Dans un premier temps, reprenant la démarche conceptuelle GRAI (DOUM-84), nous définissons le contenu des composantes physiques, informationnelles et décisionnelles. De cette analyse, nous observons, au delà du schéma classique "machine+produit", que certaines ressources nécessitent d'être prises en compte au niveau des décisions opérationnelles (BOUV-86). Ainsi, notre exposé, à caractère appliqué, nous amène à définir une fonction "PILOTE" qui, selon le concept GRAI, constitue un centre de décision directement impliqué dans la gestion des flux physiques de la cellule. "PILOTE" décide de l'affectation des produits ou de l'attribution des ressources.

Entre autre, nous orientons notre étude sur la ressource de transport. Nos observations nous ont permis d'élaborer une démarche analytique orientée selon la nature des relations entre les objets existants au sein de la cellule. En effet, il est possible de concevoir une allocation du transport vers la desserte d'une machine prioritaire, ou d'une classe de machines en fonction d'un critère structurel. C'est une démarche naturelle qui conduit à l'établissement d'une gestion par classes de déplacements. L'approche duale consiste à privilégier le déplacement de la pièce la plus prioritaire. En fait, il peut être nécessaire, dans certaines situations, de constituer une gestion qui prend en compte les trois éléments 'Machines + Produits + Transport'.

Pour illustrer notre analyse, le second chapitre présente une réalisation logicielle qui constitue un système de simulation par événements discrets. Cette application présente l'intérêt d'être complétée d'un premier niveau de décisions dites "temps réel". Cette couche est exprimée sous une forme procédurale classique.

Nous exposons chaque élément de construction de ce module ; organisation des informations sous forme de vecteurs de données, principe d'exécution des événements, méthode d'évolution du temps.... Une attention particulière est portée sur les schémas conceptuels résultant de l'analyse préalable, puis sur la mise en oeuvre des règles de gestion.

Ayant défini de nombreux leviers de gestion au sein de la fonction "PILOTE", le choix "manuel" à partir de résultats, entre l'un ou l'autre des leviers, est fastidieux. Nous proposons donc de faciliter ce choix en mettant en oeuvre une méthodologie d'aide au choix des décisions (HERI-91) sur un cas d'application de cellule flexible de fabrication. Cette méthode est basée sur une analyse statistique en composantes principales (ACP). Elle présente l'intérêt d'une visualisation globale des variables de performances. Ainsi, intégrée dans le contexte général de "PILOTE", l'ACP ouvre une voie vers une démarche raisonnée de conduite optimisée de production.

Chapitre 1

LA CELLULE FLEXIBLE DE PRODUCTION

1.1 GENERALITES

Un système de production est un regroupement de moyens de fabrication et de conduite pour réaliser une production, par découpe, transformation ou assemblage de matière. La méthode GRAI (DOUM-84) définit une approche globale et hiérarchisée des systèmes de production, que nous pouvons appliquer à notre domaine d'étude.

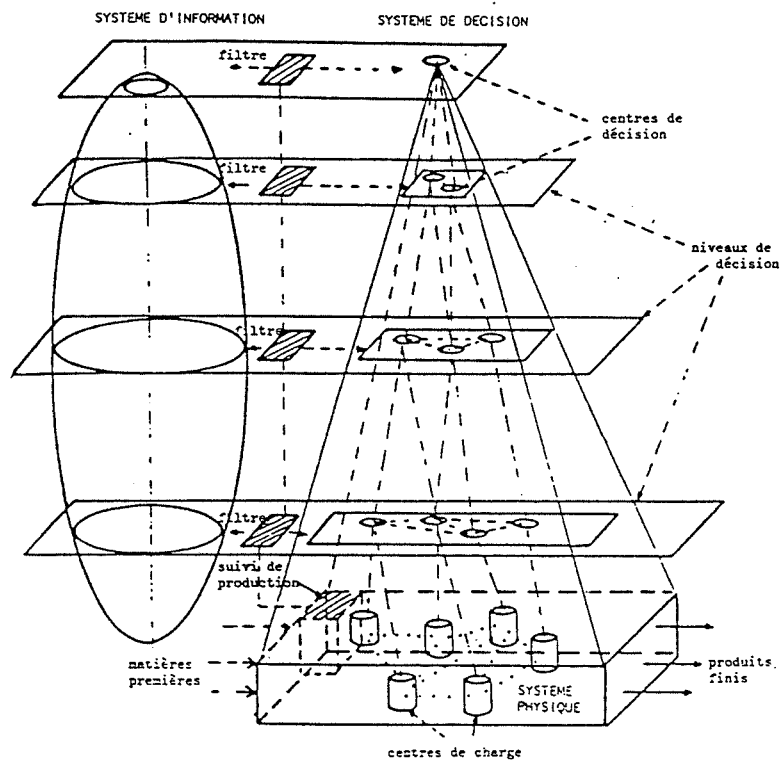


Figure 1.1: Modèle GRAI

Dans certaines configurations, l'association de ressources constitue des cellules flexibles de production. Ce regroupement de moyens permet de

fabriquer des produits différents, d'où flexibilité, dans la limite des outils mis en oeuvre. L'autonomie d'une cellule est assurée par un ensemble de moyens de conduite qui intègrent, non seulement le traitement des fonctions de base (ex : automatisme de cellule, supervision, commande déportée), mais aussi la gestion décentralisée des flux de production.

Il convient, cependant, de définir et mettre en oeuvre des moyens de gestion en temps réel de ces ressources de production.

Au préalable, rappelons la démarche qui conduit à la structuration en cellules de production.

1.1.1 Méthodes de constitution de cellules de production

Deux méthodes sont employées pour déterminer le regroupement en cellules de production.

Une réflexion simple peut suffire à regrouper diverses ressources en îlots de fabrication (ex : ligne d'usinage d'ailettes de turbines, ligne d'assemblage en composants électroniques...).

Si les produits réalisés sont nombreux et variés, il devient nécessaire de faire appel à des techniques mathématiques telles la décomposition spatiale (PORT-87), ou les méthodes de classifications automatiques de données (GARC-85) (GARC-86) qui sont les bases des Techniques de Groupe (T.G.A.O.).

La flexibilité d'une cellule de production est cependant, après cette première étape, relative à une famille de produits, puisque les techniques de groupe, entre autres, vont regrouper les produits en familles morpho-dimensionnelles.

1.1.2 Notion de machines virtuelles

La décomposition en îlots de production a plusieurs avantages. En premier lieu elle permet, comme nous l'avons vu précédemment, de ramener l'installation à un niveau d'automatisation raisonnable. D'autre part, ces méthodes visent essentiellement à réduire les problèmes d'ordonnancement de production, dits NP-Complets, en plusieurs problèmes de tailles réduites.

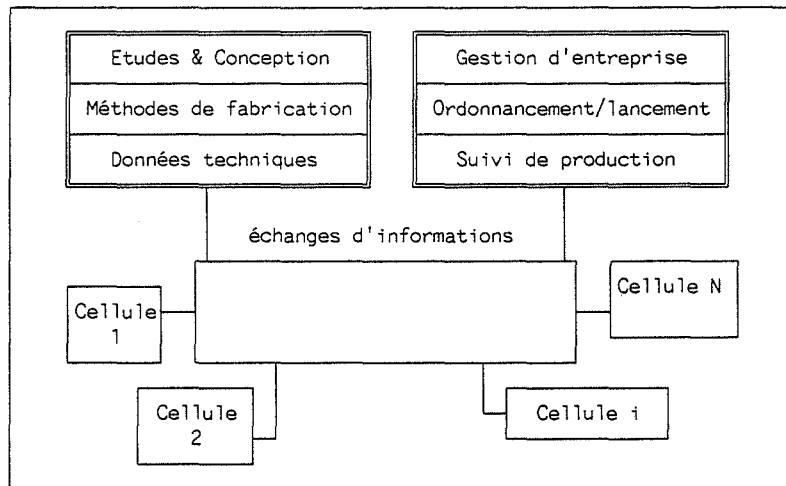


Figure 1.2: Organisation en machines virtuelles

En fait, le problème de gestion de production (Ordonnancement/lancement) est réduit pour l'atelier, et déporté au niveau de chaque cellule. Nous obtenons un modèle de production composé de machines virtuelles. Cette structure reste valable pour les autres aspects d'une entreprise (ex : études & conception, maintenance).

Si nous rapportons ce modèle d'entreprise à celui composé de machines réelles, alors, nous obtenons les correspondances :

Table 1.1: Correspondance machine réelle/machine virtuelle

Machine réelle	Machine virtuelle
Temps opératoire	Temps de cycle (Ou de passage)
Taux de panne	taux d'aléas cellules se répercutant sur l'extérieur
Temps de réglage	Temps de reconversion
Capacité unique	Capacité multiple
Commande numérique	Ordinateur de contrôle d'îlot
Programme pièce ou paramètres	Base de données techniques FAO
Changeur d'outils	Magasin centralisé d'outils

Notons, que, dans cette structure en îlot, les transports sont traités de façon différente. Un moyen propre de transport est affecté à la cellule, tandis qu'un second réseau de transport approvisionne les cellules en

matière première, transfère les produits entre cellules, et les évacue en sortie d'atelier.

Ce type d'organisation peut diminuer l'inter-dépendance entre les ressources. Ainsi, la panne d'un moyen de transport n'influe pas sur toute la production. De même, puisque les ressources possèdent leur moyen propre de pilotage, la défaillance d'un organe pilote (ex : commande numérique, ordinateur) n'a pas une répercussion immédiate sur le reste de la production.

Cependant, cette inter-dépendance implique un classement de chaque ressource et organe pilote par ordre d'importance.

En fait, il existe un optimum pour la dimension des installations automatisées. Le schéma classique de l'automatisation liée uniquement au type de production (Grande, Moyenne ou Petite série) est revu. Il prend en compte la complexité des opérations à faire subir au produit, et donc, les types de ressources, leur fiabilité, et leur niveau de dépendance.

1.2 COMPOSANTES PHYSIQUES

Les cellules flexibles de production possèdent des structures physiques différentes. Nous distinguons deux grandes familles ; celles à machines *identiques* et celles à machines *différentes* (BONE-85). Elles résultent de l'analyse, à moyen ou long terme, des charges de production. De même, les types de machine, les moyens de transport et de stockage diffèrent, eux aussi, d'une cellule à l'autre.

Tous ces éléments font que le pilotage de chacune de ces cellules n'est pas totalement identique, tant du point de vue opératoire que décisionnel.

Nous restreignons notre étude aux cas de cellules dites mono-transport, c'est à dire, dans lesquelles les produits transitent d'un emplacement à un autre par un moyen de transport unique. Celui-ci peut être un chariot, un portique ou un robot. De plus, le processus de fabrication

est limité aux applications de transformation de produits. Nous n'abordons pas le cas de cellules d'assemblage ou de "découpe" de produits.

La cellule type est composée des éléments suivants :

- Postes de travail
- Moyens de transport
- Ressources complémentaires ou annexes de production
 - Palettes
 - Montages de bridage
 - Outils
 - ...

Analysons en détails la typologie de chacun d'eux.

1.2.1 Production

Les machines sont les éléments principaux de transformation des produits. Pour réaliser notre typologie, nous devons les classer selon l'organisation des cellules, mais aussi, selon le type de processus de transformation.

Typologie

Trois types d'organisation de cellules co-existent dans l'industrie.

1°) Les machines sont regroupées par fonction de production ; c'est le cas de la cellule à machines identiques. Cette organisation augmente le nombre de serveurs pour réaliser, au sein du système de production, la même fonction. Une pièce arrivant sur ce type de cellule passe indifféremment, sur l'une quelconque des machines.

Le terme *identique* est employé au sens fonctionnel du terme, et non physique. Une cellule de tournage, est constituée de plusieurs tours identiques, mais chaque tour peut être affecté à la réalisation d'une tâche différente sur les produits. En fait, physiquement, la distinction se fait par les outils, ou par toute autre ressource annexe de production, associée aux machines.

En gestion de production une machine unique est baptisée *Poste de travail*. Une cellule de M machines identiques s'appelle *Poste de charge*.

2°) Les machines sont regroupées par produit. C'est l'organisation en cellules à machines différentes. Sur ces cellules, le produit circule sur les machines dans un ordre quelconque, en fonction de sa gamme de production. C'est le JOB SHOP.

Dans le cas particulier où le produit passe successivement sur chacune des machines de la cellule, FLOW SHOP, l'organisation est appelée *en ligne*. Par exemple, une ligne est composée de cinq machines qui réalisent successivement l'ébauche, l'usinage, la finition, le lavage et le contrôle.

3°) Le dernier type de cellule est la possibilité de mixage des deux précédentes. Une cellule peut être composée de machines différentes, organisées en ligne, mais une opération longue peut justifier l'utilisation de plusieurs machines identiques.

Modèles de processus de transformation

Nous pouvons classer les processus de fabrication en quatre grandes catégories. Ceci vis à vis de l'organe de pilotage, et selon les notions de "maître/esclave" ou "d'acteurs" (Cf. "composantes informationnelles"). Dans le cadre des rapports de type "acteurs", nous trouvons les processus autonomes ou semi-autonomes. A l'opposé, des processus pré-programmés ou programmables sont des "esclaves" vis à vis du processus "maître", "PILOTE" (cf. "Eléments de pilotage").

* Processus autonomes

Pour déclencher ou commander la transformation du produit, les processus autonomes ou figés ne nécessitent aucune intervention de "PILOTE", c'est le cas, par exemple, du traitement de surface ; le produit reste dans un bac pour un temps donné, puis doit être extrait, et passé dans le bac suivant.

Une cellule d'usinage organisée en ligne, peut être composée, uniquement, de processus autonomes :

- * Si les pièces usinées subissent le même type de transformation, le processus est *figé*.
- * Si les pièces sont différentes, et les automatismes locaux, associés aux machines, sont aptes à identifier les pièces pour déterminer le processus de transformation à appliquer, alors dans ce cas l'automatisme local (A.L.) contient une *bibliothèque* de programmes "pièces".

Nota : Cellule flexible et processus autonome ne sont pas des notions incompatibles. En effet, si le processus est *figé*, rien ne l'empêche d'être conçu pour transformer des produits différents. S'il n'est pas figé, sa bibliothèque peut contenir un nombre suffisant de programmes, pour prendre en compte tous les produits susceptibles d'être transformés.

Cependant, ceci est relatif ; lorsqu'un nouveau produit doit être pris en compte, la cellule subit une phase de reconversion. Cette reconversion nécessite des opérations manuelles de chargement ou de déchargement de programmes, d'outils ...

* Processus semi-autonomes

Le développement des communications entre ordinateur et commande numérique (ex : liaisons D.N.C., applications réseaux), pallie, en partie, à l'aspect de reconversion des processus autonomes. Il réalise l'accès aux bases de données techniques mises en commun.

Néanmoins pour compléter cet apport d'informations, il est nécessaire que la machine s'approvisionne en outils manquants.

Un processus est dit semi-autonome s'il possède les moyens d'étendre son autonomie à une production variée, tout en restant maître de ses actions.

* Processus pré-programmés

Les processus pré-programmés requièrent un minimum d'informations en provenance de "PILOTE". C'est la classe des transformations que nous appelons paramétriques.

Par exemple, une machine de lavage est pré-programmée. Les paramètres sont les temps de réglage et de séchage à appliquer. Dans ce cas là, "PILOTE" indique à la machine les durées souhaitées.

* Processus programmables

Les processus programmables nécessitent une intervention plus importante de "PILOTE" : le téléchargement de programme.

La machine qui réalise ce type de processus est considérée "vierge" d'informations avant l'arrivée d'une pièce. "PILOTE" doit assurer tous les préparatifs ; téléchargement de programmes, approvisionnement des outils...

1.2.2 Manutention

Le transport par convoyeur

Nous présentons ce mode de transport uniquement à titre de rappel.

L'intérêt du convoyage réside dans le couplage de la fonction transport avec la fonction stockage. Dans certains types de production, où les opérations sont courtes, on privilégie ce mode de transport. C'est le cas, par exemple, de cellules d'assemblage de composants électroniques.

Le transport par convoyeur revêt des formes multiples. Nous en retiendrons deux : mono ou multi-convoyage.

Dans le cas d'un système mono-convoyeur, les pièces circulent soit en lignes, soit en boucle. Les machines sont disposées immédiatement aux abords du convoyeur. Dans le cas d'une ligne, une pièce, en attente d'une machine, est susceptible de saturer le circuit.

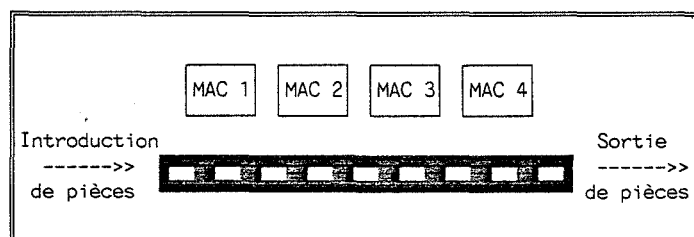


Figure 1.3: Convoyeur en ligne

En boucle, les pièces en attente circulent constamment. La saturation est moindre, mais elle dépend du rapport de pièces en attente et du total de pièces. Ce système, peu coûteux, est relativement bien adapté pour des processus figés. Cependant, les investissements, dans certains cas, sont reportés vers les systèmes de chargement/déchargement de machines.

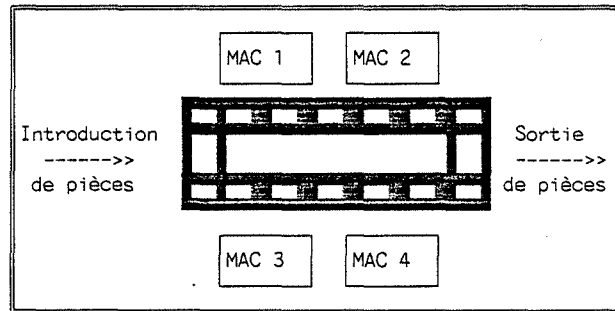


Figure 1.4: Convoyeur en boucle

Pour résoudre les problèmes de circulation de produits différents devant passer sur une même cellule, la solution de convoyeur multiple est envisagée. Le cas classique est l'emploi de "boucles de dérivation" pour desservir les machines.

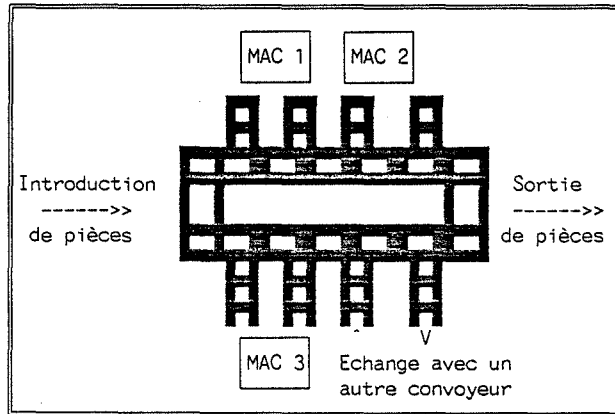


Figure 1.5: Convoyeur multiple

Les systèmes à convoyeurs sont relativement figés. Cependant, certaines configurations peuvent inclure des organes de routage commandés par "PILOTE" à certains carrefours du réseau.

Le transport libre

Un transport libre est un moyen susceptible de réaliser la presque totalité des déplacements souhaités. Dans ce cadre là, nous trouvons les portiques, robots, navettes ou chariots.

Un transport libre emprunte un réseau de transport, composé de tronçons et de carrefours. L'accès à une machine est direct ou en dérivation par rapport à ce réseau.

Nous rejoignons le principe des convoyeurs. Néanmoins, le nombre de pièces en circulation est plus faible, et il devient nécessaire de définir la notion de stocks tampons.

Le cas étudié ultérieurement est un transport libre qui dessert les postes de la cellule. Nous ne parlons donc pas des aspects de réseaux de transport (ex : chariots filoguidés).

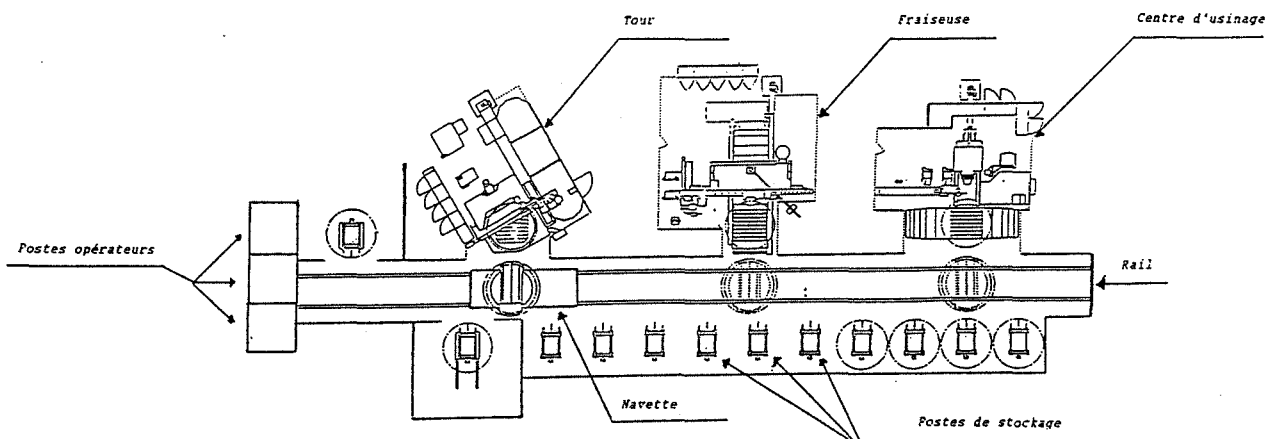
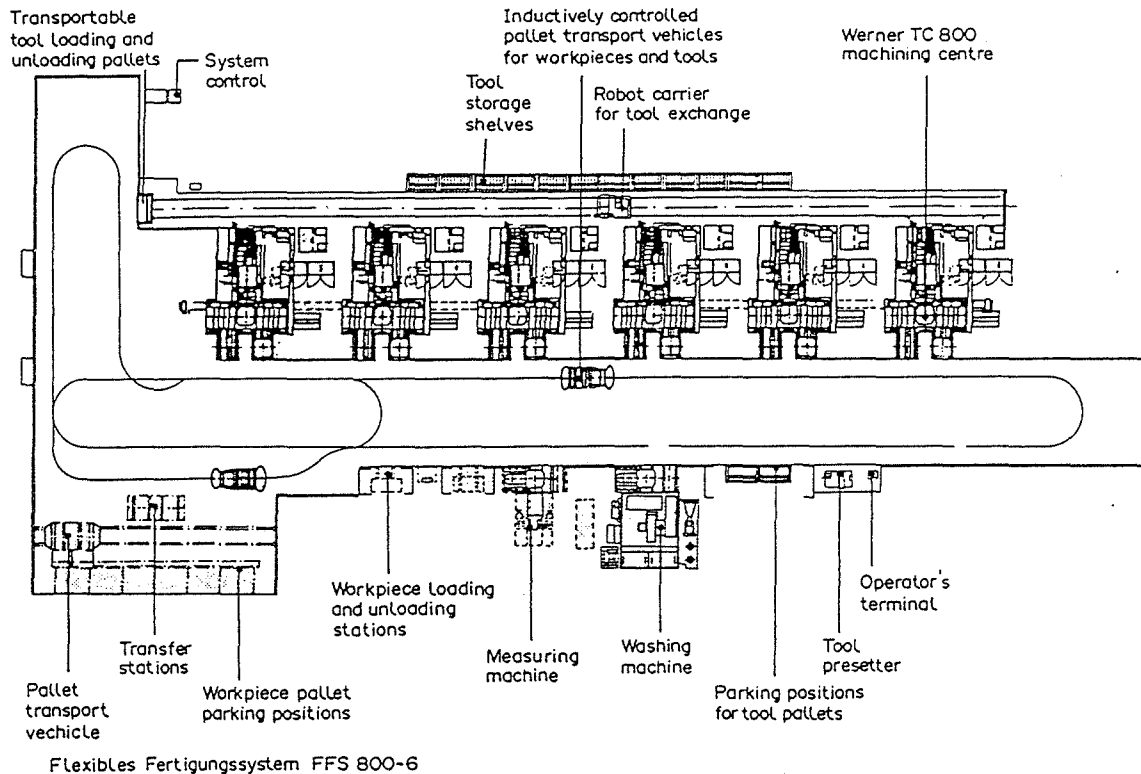


Figure 1.6: Cellule avec un seul transporteur



FFS 800-6 flexible manufacturing system with 6 TC 800 machining centers with inductively controlled shuttle for the transport workpiece pallets, tool storage and handling device, high-bay store, washing machine and integral measuring machine.

Figure 1.7: Cellule avec réseau de transports libres (HAMM-87)

Transport dit "manuel" : Ce mode de manutention, cas particulier du transport libre, dépend des opérateurs. Chacun réalise le déplacement des produits d'une machine à une autre. Fréquemment, ces cellules de fabrication sont organisées en ligne. Des stocks intermédiaires, entre machines, sont créés. Ils pallient à la polyvalence des opérateurs. Le schéma précédent est reconstitué dans le cas où une seule personne est chargée des manutentions de toute la cellule.

1.2.3 Stockage

Les systèmes de stockage ont deux rôles. Le premier consiste, comme nous venons de le citer, à pallier aux *limites de capacités* du système de transport. Le second, est lié à l'organisation de la cellule. Le stock est un moyen d'*autonomie* de la cellule ou de réalisation de la *fluidité* de la production.

L'autonomie de la cellule est définie, ici, en capacité horaire à produire sans intervention humaine. L'opérateur approvisionne la cellule en

pièces à réaliser avant de quitter son poste. Le système peut produire de façon automatique jusqu'à épuisement du stock de pièces à réaliser.

La fluidité dépend des charges de production de chaque machine. Dans le cas où les charges sont relativement identiques entre chaque machine, mais où les temps opératoires des pièces diffèrent, il est souhaitable de posséder des moyens de stockage. Ces moyens font effets de "tampons" entre les machines.

Sur l'exemple suivant, les machines "Mach 1" et "Mach 2" ont une charge de travail similaire. Toutefois, certaines pièces sont stockées entre chaque opération.

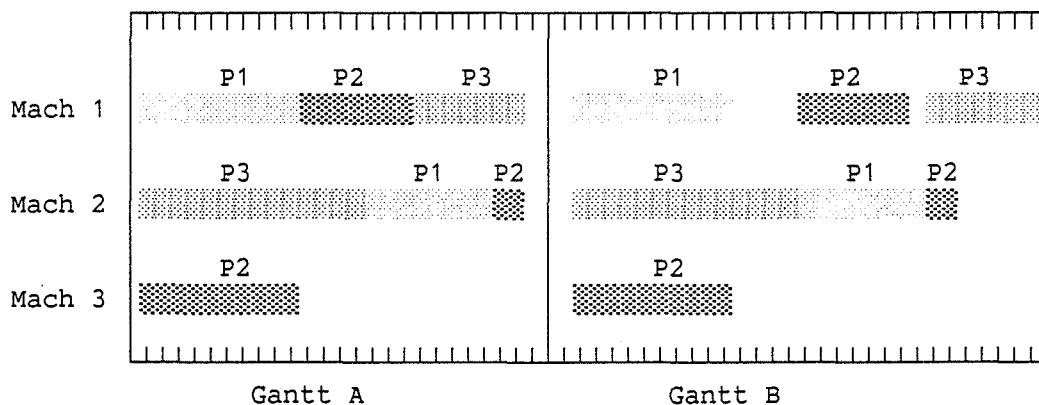


Figure 1.8: Stockage inter-opérateur

Le stockage tampon est utilisé en sortie de la machine 1 par la pièce P1 puis par P2 en attendant la mise en disponibilité de la machine 2. C'est le cas illustré par le diagramme de Gantt A. Le diagramme de Gantt B montre le même cas sans stockage possible. L'effet est négatif, puisque la pièce P3 est retardée, et le temps total de fabrication plus important.

Un rôle secondaire est le stockage des ressources annexes de production (ex : outils, palettes vides).

Techniquement, plusieurs moyens de stockage existent. Nous désignons par stocks tampons tous les moyens de stockage situés aux abords des machines. Physiquement, ce tampon se concrétise par des postes de transferts immédiats, ou par une table multi-accès avec déplacement de la machine. Dans d'autres cas, un carrousel s'apparente au stockage tampon.

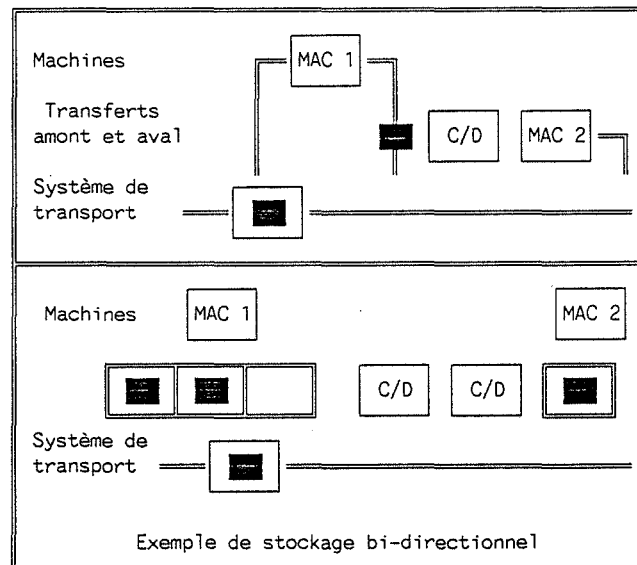


Figure 1.9: Exemples de stockage tampon

Le stockage commun est partagé entre les ressources de production. Il permet de stocker les pièces en cours de fabrication, mais aussi certaines ressources annexes. C'est une sorte de magasin.

L'accès à cette zone commune peut être de deux sortes :

1°) Tous les transferts sont obligatoirement réalisés par le système de transport.

2°) Le stockage commun est associé, en parallèle, au poste de chargement/déchargement. Cette seconde solution permet de désynchroniser les tâches de l'opérateur de celles de la cellule. D'autre part elle facilite le contrôle des produits en cours de fabrication.

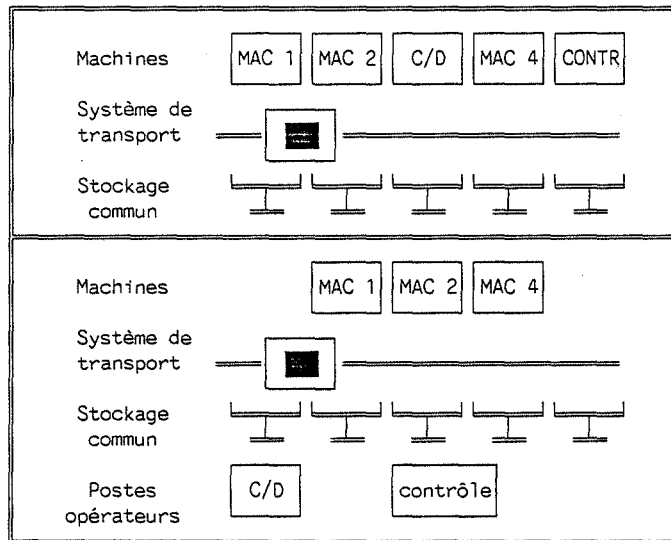


Figure 1.10: Exemples de stockage commun

Nota : Dans le second cas, les transferts entre stockage et postes opérateurs peuvent être réalisés, par exemple, à l'aide d'un second moyen de transport, ou d'un stockage rotatif.

1.2.4 Ressources annexes de production

Nous désignons, par ressources annexes de production, tous les éléments nécessaires à la réalisation d'un produit sur un poste de travail. Ce sont, par exemple, un outil de coupe ou un opérateur. La mise en oeuvre de ces ressources s'exprime sous la relation générale suivante :

(Une pièce de type T,
montée sur l'ensemble "palette+bridage" de type P,
subit l'opération n° I,
sur la machine n° J,
avec les outils $O(O_1, \dots, O_o)$,
selon le programme pièce n° K).

Au niveau de la cellule nous affectons les ressources annexes, soit aux machines, soit aux produits. Cette affectation n'est pas figée, puisqu'elle résulte de l'éclatement de la relation précédente.

Ressources affectées aux machines

Les ressources affectées aux machines sont employées uniquement lors de la phase de transformation du produit. Nous regroupons sous cette terminologie les éléments suivants :

- Les outils : immuables (ex : outils de contrôle ou de mesure), ou consommables (ex : fraise) ils sont affectés à une machine ou à un groupe de machines (ex : magasin local, magasin commun).
- Les opérateurs exécutants, affectés à une ou plusieurs machines
- Les paramètres machines ou les programmes pièces
- Tous produits consommables autres que les outils (ex : eau, huile, énergie).

Nota : Dans le domaine des outils, les configurations sont nombreuses. Elles sont liées à divers critères (ex : durée de vie, coût unitaire, durée d'utilisation, spécificité technique). Deux aspects techniques sont à prendre en compte ; la configuration au niveau de la machine, et le lien avec le réseau de transport de la cellule. Nous détaillons ces aspects ci-dessous.

Par principe, un programme pièce indique à la commande numérique, le n° de la case (j) où se situe l'outil à utiliser. La machine n'a aucune connaissance du type d'outil. Elle possède uniquement ses données techniques. A partir de là, trois cas se présentent :

- a) configuration figée : la machine est configurée avec un magasin identique d'outils, quelque soit la pièce. Tous les programmes pièces doivent prendre en compte cette contrainte.
- b) configuration interchangeable : le magasin d'outils est reconfigurable en totalité, par un système de changeur interchangeable. Avec le programme pièce, il est donc nécessaire d'associer une référence à un changeur.

Lors de la mise en place d'un changeur, il faut introduire les données techniques de chaque outil présent. De même, après utilisation de ces outils, il est indispensable de mettre à jour ces données, soit par une indication machine au "PILOTE", soit par un contrôle d'outils indépendant.

c) configuration flexible : le magasin d'outils est reconfigurable partiellement par l'échange d'un ou plusieurs outils avec un stockage commun aux machines.

Notion de gestion "Random" : pour s'extraire des contraintes de placement dans le magasin d'outils, la machine peut contenir sa table de gestion dynamique des cases. Dans ce cas, il est possible de gérer une codification des outils indépendante des magasins spécifiques à chaque machine.

(WARN-86) présente quelques configurations "outils" :

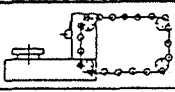
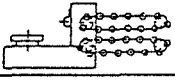
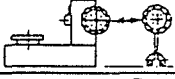
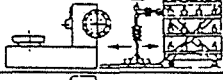

tool storage and transport	storage capacity per machine tool	time fraction per tool change over	bound capital for tools in the manufacturing system
 One machine-integrated circulating magazine	40 - 100 tools	large	large
 Two machine-integrated circulating magazines	60 - 120 tools	small	large
 interchangeable disc-magazines	20 - 40 tools	medium	medium
 successive interchange of single tools from a stationary auxiliary magazine	20 - 40 tools	none	medium - small
 automatic interchange of single tools with mobile industrial robot	20 - 40 tools	none	small

Figure 1.11: Exemples de stockage d'outils (WARN-86)

D'autre part, le lien avec le réseau de transport de pièces a évolué. La manutention et le stockage de ces outils, après avoir été associés à ceux des produits, sont devenus plus indépendants. La machine n'a plus un seul "interlocuteur" pour charger ou décharger pièces et outils, mais plusieurs.

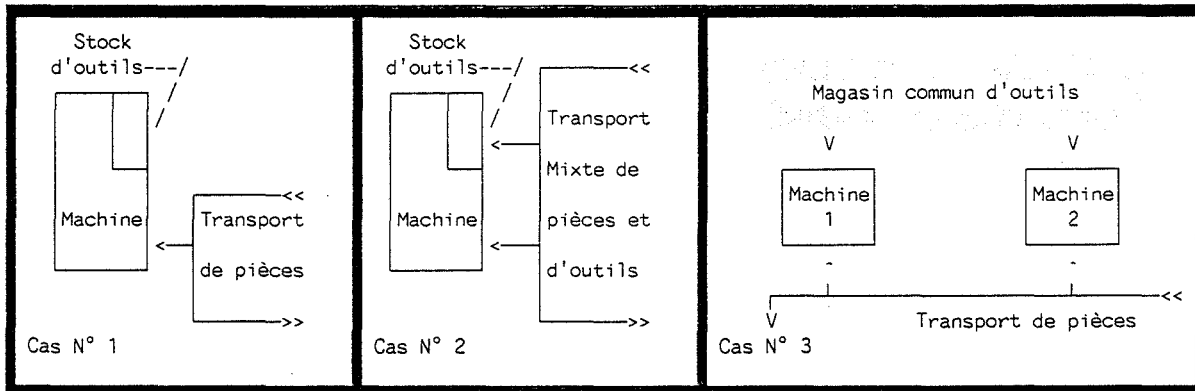


Figure 1.12: Configurations stockage d'outils

La figure précédente illustre quelques cas de stockage d'outils.

- Le cas N° 1 correspond à une machine comportant son stock d'outils. Ces outils sont changés lors de phases de maintenance ou de reconversion de l'atelier. Toutefois, le remplacement d'outils est réalisable en cours de production, mais ceci de façon manuelle.
- Le cas N° 2 utilise la même fonction transport pour faire transiter les produits et les outils. Cette configuration est admissible quand elle est supportée par un opérateur humain. Sinon, elle nécessite des solutions techniques complexes et coûteuses. Le transporteur, robot ou chariot, doit être équipé pour manipuler les deux types d'éléments.
- Le cas N° 3 rend indépendant les diverses fonctions de production, le transport des outils étant séparé de celui des produits.

Le choix d'une configuration dépend du type de processus de transformation mis en oeuvre au sein de la cellule.

Ressources affectées aux produits

Dans certaines cellules, des systèmes "palette+bridage" jouent le rôle d'interface entre le produit et les moyens de production. Une pièce circulant dans une cellule de fabrication nécessite un tel système.

La figure suivante présente un ensemble "palette+bridage" sur lequel est montée une pièce.

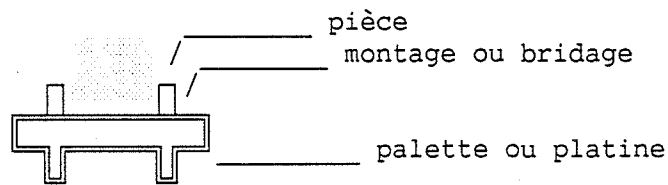


Figure 1.13: Schéma de principe interface machine/produit

Trois types de configuration existent.

- Sans interface ; les pièces circulent librement dans la cellule. C'est l'exemple où un robot réalise la manutention des pièces.
- Palettes avec bridage intégré ; les palettes sont conçues avec leur bridage. La cellule contient des palettes différentes. Cette solution est utilisée, soit pour des raisons technologiques, soit dans le cas où les produits à réaliser sont relativement figés.
- Palettes et bridage adjoint ; dans ce cas, la cellule contient des palettes banalisées, appelées platines, sur lesquelles l'opérateur installe un montage. Ce montage joue le rôle de bridage. Il est adapté à un type de pièces.

Cette solution augmente la flexibilité ; une combinaison de montages peut résoudre le bridage d'un nouveau type de pièce.

1.2.5 Récapitulatif

A partir de l'analyse précédente, nous pouvons élaborer un tableau récapitulatif, regroupant les principaux types de composantes physiques des cellules de production. Ce tableau aide à définir les moyens de pilotage et de gestion de la cellule.

Table 1.2: Composantes physiques d'une cellule de production

Types de ressources	Typologies
Machines	Identiques Différentes "en ligne" Différentes quelconques Mixage
Processus	Figé ou autonome semi-autonome Pré-programmé ou paramétré Programmable
Transport	Manuel Convoyeur Libre (Chariot, Robot...)
Stockages	Sans Aux abords des machines Stockage commun
Ressources liées aux machines	Sans Affectés à la machine Commun à plusieurs machines
Ressources liées aux produits	Sans Palettes avec bridage intégré Palettes complétées d'un montage

1.3 COMPOSANTES INFORMATIONNELLES

Les composantes informationnelles d'un système de production dépendent des moyens mis en oeuvre. Deux grandes classes d'informations sont nécessaires pour le pilotage ; les informations techniques et les informations de gestion.

Ces deux classes sont subdivisées en informations figées, i.e. propres à un centre d'information, et en informations évolutives, pouvant être échangées entre divers centres.

Par exemple, l'automatisme d'une machine, i.e. ses règles de fonctionnement, sont des informations figées. Tandis que le programme

d'usinage, ou les paramètres de transformation sont des informations évolutives, donc, susceptibles d'être modifiées à tout instant.

La classification des informations selon ce modèle est évident pour la plupart des éléments et peut paraître inutile. Cependant elle doit être réalisée minutieusement en phase de pré-étude. Car de cette classification découle la flexibilité du moyen de production, la composition technique du système d'informations, la répartition et la localisation des informations.

D'autre part, l'étude du système d'informations distingue les ressources actives et les ressources passives. Une ressource active comporte un moyen spécifique de traitement de l'information. C'est, par exemple, une machine ou un moyen de transport. A l'opposé, une ressource passive est dénuée d'intelligence, c'est un casier de stockage ou un système "palette+bridage". A la limite, une ressource passive est munie d'une mémoire. Cette mémoire contient les éléments définissant cette ressource, c'est sa carte d'identité.

1.3.1 Informations techniques

Les informations techniques fournissent les données indispensables à la réalisation de la production. Elles regroupent les éléments suivants :

- Règles de fonctionnement des moyens de production
- Etat instantané des ressources (ex : étape du cycle d'une machine, stock occupé, défaut alimentation d'un transporteur)
- Description des processus de transformation (ex : programme pièces, liste de paramètres, gammes de fabrication)
- Liste des ressources annexes de production à employer pour réaliser une ou plusieurs transformations.
- Description des ressources annexes (ex : définitions et caractéristiques des outils)

Pour chaque ressource de production active, nous associons ses règles de fonctionnement sous la forme d'un Automatisme Local (A.L.). Celui-ci

prend en charge l'exploitation des informations *évolutives* à employer par cette ressource.

Par exemple, dans le cas d'un chariot filoguidé, son A.L. traite les cycles de mise en route ou d'arrêt. "PILOTE" (cf. "Eléments de pilotage") prend en charge les conflits entre chariots sur les tronçons et aux carrefours. La destination d'un chariot chargé est une information *évolutive*, elle diffère d'une pièce à l'autre. L'A.L. agit en fonction de cette destination.

Les informations techniques sont employées, également, pour la maintenance des moyens de production et le contrôle de qualité des produits.

Nota : Le nombre de ressources d'un même type (ex : capacité d'un magasin, nombres d'outils de même type) n'est pas seulement une donnée technique, mais de gestion. Les règles de fonctionnement ne prennent en charge que les limites de capacités.

L'exploitation de la capacité est du ressort de la gestion. Cette remarque est valable essentiellement dans le cas d'une gestion temps réel, où l'aspect *capacité finie* est traité en totalité.

1.3.2 Informations de gestion

La gestion est l'art d'organiser l'exécution des tâches en fonction des moyens pour une meilleure efficacité du système de production. Les informations nécessaires aux gestionnaires sont commerciales et techniques. Elles regroupent le carnet de commandes, la liste des moyens nécessaires pour réaliser chaque opération (en type, quantité et temps d'utilisation) et les capacités existantes de chacun des moyens.

La figure suivante présente la circulation des informations nécessaires à la gestion "temps réel" des produits et ressources.

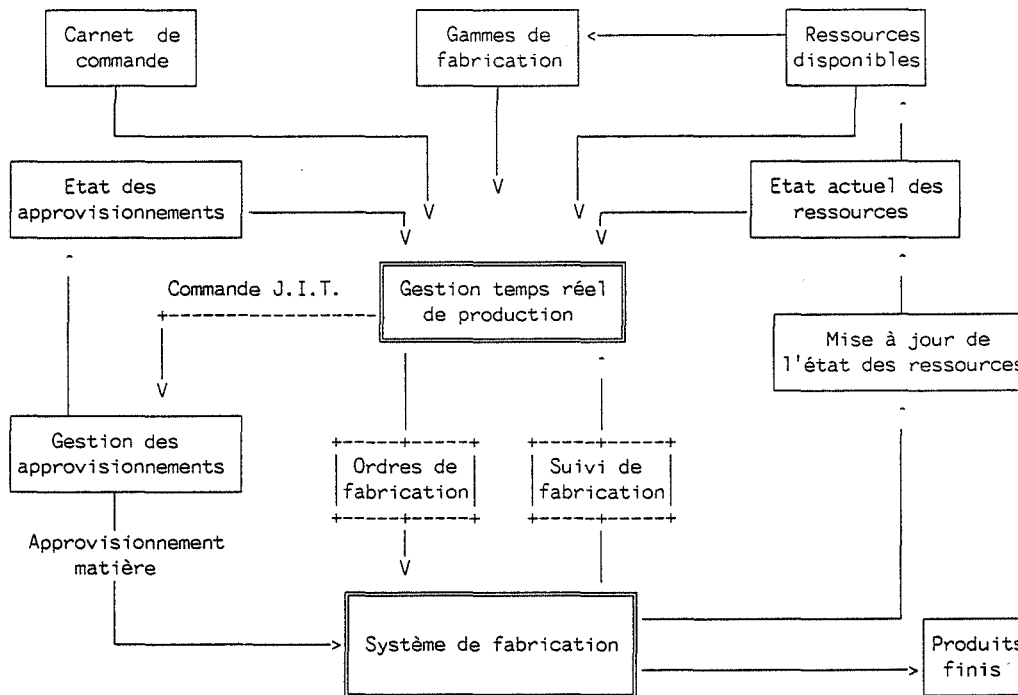


Figure 1.14: Informations de gestion temps réel

Le *carnet de commandes* (ou plan directeur pour les applications type MRP) établit :

- > Les types de produits à fabriquer
- > Les quantités à produire
- > Les dates ou délais de livraison souhaités
- > Les dates de disponibilité de la matière brute

Les *gammes de fabrication* informent sur les moyens à mettre en oeuvre pour réaliser les produits. Chacune d'elle est une liste d'opérations qui décrit :

- > Le ou les postes de charge susceptible(s) de réaliser l'opération
- > Les ressources annexes nécessaires
- > Le temps prévu pour chaque opération

Une opération de remplacement se substitue à une autre opération en fonction du contexte réel de production. Elle est employée, par exemple, dans les cas de figures où :

- > Les ressources nécessaires sont en panne
- > Les ressources sont déjà employées
- > Une contrainte technique force à choisir l'opération de remplacement (ex : un même type de produit doit passer sur la même machine).
- > Une règle de gestion répartit les produits en fonction du contexte d'encombrement des flux de production (ex : utilisation de la file d'attente suivante la plus courte).

Nota : Une gamme de fabrication étendue ou gamme de circulation, indiquera, non seulement chaque opération de transformation du produit, mais aussi toutes les opérations annexes de transport et de stockage.

Une gamme de circulation est, ainsi, plus adaptée à décrire l'emploi de ressources utilisées, sans interruption, pour plusieurs opérations successives (ex : "palette+bridage").

Les *ressources disponibles* indiquent quels moyens de production existent pour transformer ou transporter le produit. La connaissance des ressources disponibles fournit un volant de manoeuvre à la flexibilité du système de production.

- > Nombre de machines disponibles par postes de charge
- > Nombre de montage par type.
- > Nombre de ressources de transport
- > Périodes de disponibilité, ou horaires de fonctionnement

L'*état actuel des ressources* regroupe l'état physique des moyens de production à chaque instant. Outre l'utilisation de ces informations par les services de maintenance, le gestionnaire les emploie pour modifier, si besoin, les ordres de fabrication. En temps réel, cet état aide à établir les choix quant aux opérations de remplacement.

L'*état des approvisionnements* informe sur les dates de lancement possibles, au plus tôt, des produits. Dans un contexte de gestion en "Juste à Temps", la gestion en temps réel réalise les demandes d'approvisionnement matières selon le contexte de production.

Le *suivi de fabrication* permet de connaître l'état d'avancement de chaque ordre de fabrication.

Les *ordres de fabrication* (O.F.) indiquent, au système de production, les tâches à réaliser par chaque ressource de production. Ces O.F. sont émis à l'intention des centres d'information actifs pour traitement et exécution.

Prenons l'exemple de l'usinage d'une pièce sur une machine munie d'une commande numérique et d'un magasin d'outils approprié. Le centre de gestion vérifie la disponibilité de la pièce à usiner, la présence des outils nécessaires dans le magasin et la disponibilité de la machine.

L'ordre de fabrication indique le type de pièce à usiner et le programme "pièce" à employer. La machine, centre d'information actif, réalise l'usinage, et traite aussi l'amenée des outils et des autres ressources annexes qui relèvent de son domaine.

En temps réel, les O.F. sont conçus après analyse de toutes les capacités du système de production. Ils sont aussi révisables lors de chaque événement important. Par exemple, lors d'une panne machine ou d'une mise au rebut d'un produit.

Un ordre de fabrication, provenant d'une gestion en temps réel est dit *cohérent*. Cette notion signifie que toutes les actions, liées à un ordre donné, sont réalisables, donc que toutes les ressources ou matières associées à celle-ci sont disponibles avant la date $t + \delta t_a$ (avec t date de l'instant présent et δt_a délai d'anticipation).

1.3.3 Centres d'information

Les informations techniques et de gestion sont distribuées dans différents centres d'information. L'établissement de ces centres est fondamental en automatisme. Il permet de dimensionner les moyens à mettre en oeuvre pour le traitement de l'information. Si, dans le domaine des automatismes locaux, le dimensionnement est aisé, il l'est moins, lorsque nous abordons des installations à niveau de communication élevé.

* Informations évolutives ou figées

Nous avons vu qu'il existait deux types d'informations : figées ou évolutives. Ces informations constituent soit des données, soit des règles d'évolution de ces données. Celles-ci déterminent quatre sous-classes :

- (Données, Figées) : Distance entre deux machines
- (Règles, Figées) : Automatisme Local
- (Données, Evolutives) : Usure d'un outil
- (Règles, Evolutives) : Programme d'usinage d'une pièce

La figure suivante présente la composition d'un centre d'information, et les échanges possibles avec l'extérieur.

Remarque : Les informations figées, ne le sont que vis à vis d'une utilisation en mode exploitation du centre. Elles peuvent être modifiées dans le cadre d'actions correctives.

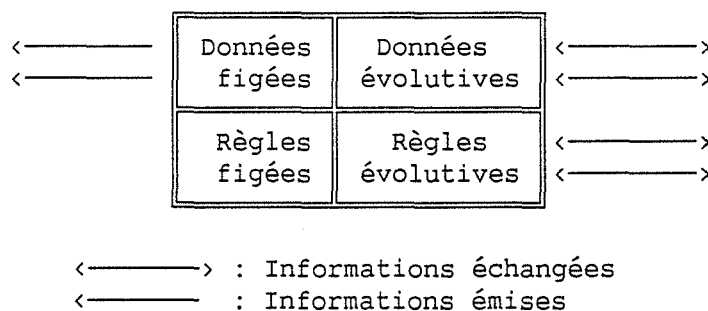


Figure 1.15: Composition d'un centre d'information

* Activité d'un centre d'information

Un centre d'information utilisant des règles, figées ou évolutives, est actif, par opposition à passif, i.e. ne comportant que des données.

Les principaux centres d'information d'une cellule de fabrication sont :

- Actifs :
 - Organes de contrôle/commande de machine, de transporteur ou de magasin d'outils
 - Eléments de support de la base de données techniques ou/et du système d'aide à la conduite
 - Superviseur de cellule
 - Opérateur(s)

- Pilote de cellule
- Gestionnaire des organes de transmission de l'information
- Passifs :
 - Pièces
 - Outils
 - Palette+bridage

Physiquement, ces centres peuvent être regroupés au sein des mêmes moyens, ou répartis sur des moyens spécifiques. Ceci dépend du volume d'informations à traiter, et de l'inter-dépendance souhaitée entre les moyens.

La fonction "PILOTE" (cf. "Eléments de pilotage") peut être supportée par l'ensemble des moyens de production. Par exemple, une machine dialogue avec le transporteur lors de phases de synchronisation ou pour anticiper sur la prochaine pièce à charger.

* Echange d'informations

Les échanges transmettent les informations évolutives entre chaque centre. Ces échanges ont comme objectifs :

- La mise à jour de données ou de règles inadaptées au processus en cours (ex : téléchargement de programme, circulation de données de synchronisation, remontée d'états vers le gestionnaire, modification des paramètres de transformation)
- La collecte d'informations en vue de leur analyse ultérieure (ex : historique de production, suivi des défauts)

Ces échanges sont traités soit par une mise en commun permanente de données, soit par communication spécifique entre chaque ressource sous forme d'un langage d'interrogation.

* Notion d'autonomie

Lors de notre description de la typologie des processus de production, nous avons abordé les notions de processus autonomes. Un processus autonome

réagit en fonction de l'évolution de son environnement. Son niveau d'autonomie est fonction de son comportement face à un nouveau contexte.

Une hiérarchie de type "maître/esclave" implique que l'autonomie est supportée par le maître. Dans le cas du couple pilote/machine, "PILOTE" télécharge les programmes sur la machine, s'assure de l'approvisionnement des outils dans le magasin d'outils "machine", ou arrête la machine si les conditions de travail sont reconnues incorrectes... Tout ceci implique d'importants échanges d'informations entre les deux éléments.

Le principe des moyens de production semi-autonomes est la voie la plus employée actuellement, pour le concept d'ateliers flexibles (DUFF-87). Son intérêt réside dans la notion d'acteur ou d'objet. Chaque ressource de production est indépendante. Elle comporte des règles de contrôle de son processus : surveillance d'usinage, requête d'approvisionnement d'outils ou de programmes pièces.... La cohérence de l'ensemble de production est assurée par le biais d'un "metteur en scène".

Dans le cadre de processus semi-autonomes, les échanges sont tout aussi importants, mais les centres d'information sont allégés, et peuvent être destinés à leur application initiale.

1.3.4 Eléments de pilotage

Nous venons de définir les constituants physiques et d'informations existants dans une cellule de production. Pour activer cette cellule, nous lui associons une fonction de conduite de bas niveau.

Véritable "système nerveux", la fonction "PILOTE" possède diverses facettes allant du traitement de l'information à la prise de décision en temps réel. Dans les chapitres suivants, nous étudions cette fonction en insistant sur les aspects décisionnels.

Les concepts

"PILOTE" répond à la question posée par chaque ressource de production
"Je suis dans cet état là, que dois-je faire ?"

"PILOTE" prend des décisions élaborées selon des règles opératoires ou des règles de gestion ou l'influence d'un niveau supérieur. Il fait exécuter les décisions qu'il a prises. En parallèle, la SUPERVISION informe "PILOTE", ou l'utilisateur, de l'état des ressources et de la bonne réalisation des décisions.

Notre modèle de pilotage des moyens de production est de type hiérarchique. C'est à dire que chaque niveau agit sur le niveau directement inférieur par application de consignes. D'autre part, il avise le niveau supérieur des actions exécutées.

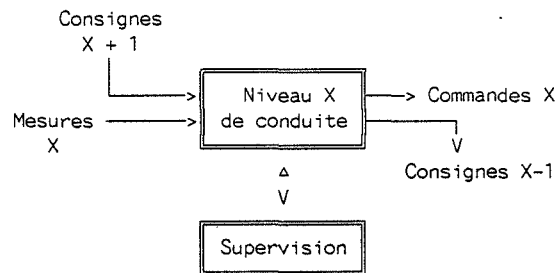


Figure 1.16: Relations entre niveaux hiérarchiques (NUSS-86)

Chaque niveau est vu comme une boucle de conduite. Localement, i.e. à l'échelle d'une ressource, nous retrouvons un Automatisme Local (A.L.), agissant sur une fonction commande, interface avec le moyen physique. L'A.L. est informé de l'exécution d'une action par "lecture" de capteurs.

Au niveau d'une unité de production (cellule, atelier, usine), chaque A.L. est actionné par un moyen de conduite (ex : opérateur, logiciel de pilotage). Une couche communication gère les échanges d'informations entre les deux niveaux. La supervision instruit le moyen de conduite de l'exécution des ordres donnés.

Finalement, au stade de l'entreprise, le suivi de production, et les décisions de commande permettent aux moyens de gestion d'influer sur la fonction pilotage.

La figure suivante présente les principaux composants de la fonction "PILOTE" :

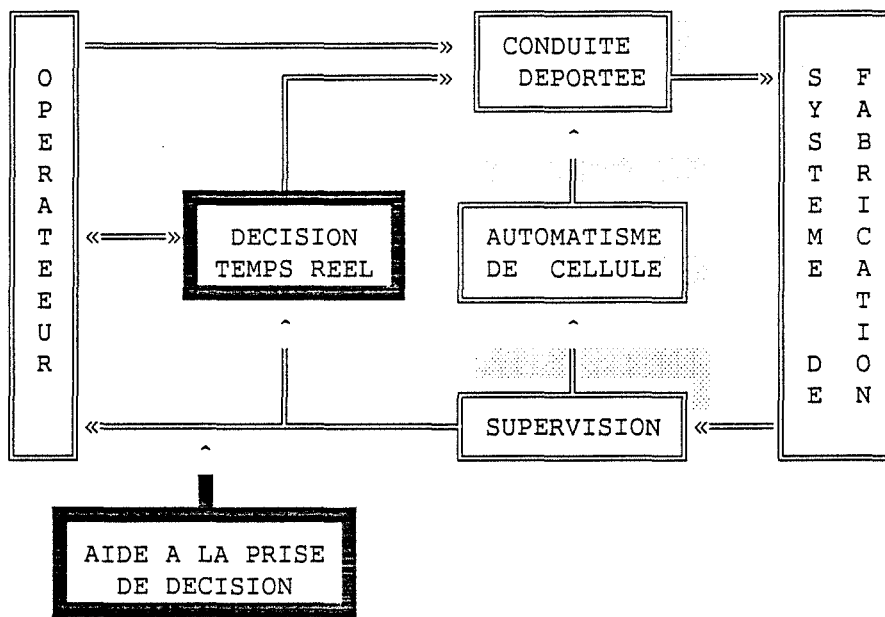


Figure 1.17: Concepts de pilotage

Nous n'avons pas fait apparaître sur le schéma ci-dessus les informations venant du niveau de conduite supérieur, c'est à dire la gestion de production. En fait, la gestion applique des ordres sur l'opérateur ou le centre de décision temps réel, à partir d'un suivi de production et de l'avancement du carnet de commandes.

Nous détaillons, ci-dessous, les divers blocs fonctionnels de notre schéma.

Principaux constituants

* Automatisme Local (A.L.)

Les éléments de pilotage au niveau d'une ressource de production (ex : machine, transport) sont regroupés autour du concept d'automatisme local (A.L.).

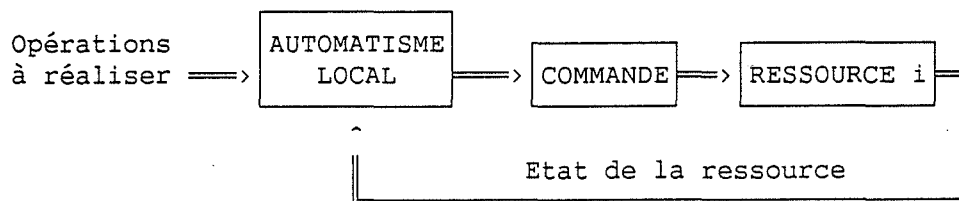


Figure 1.18: Conduite d'une ressource

La fonction **COMMANDE** déclenche les actionneurs de chaque ressource pour réaliser l'action que chacune doit effectuer (ex : rotation d'une broche, activation d'un vérin).

La fonction **OPERATOIRE** traite les règles opératoires pour agir sur la partie commande. Ces règles sont décrites selon une séquence logique avec des outils de type **GRAFCET** (ex : séquence de chargement de machine par un chariot, séquence de contrôle de pièces). Cette fonction opératoire ne dépend pas du niveau d'automatisation de l'installation. Sur une machine traditionnelle, l'opérateur exécute certaines opérations répétitives, dans un ordre pré-déterminé.

Au niveau de la ressource, les règles opératoires correspondent à l'automatisation classique d'une ressource. l'A.L. déclenche les actionneurs pour obtenir un état donné de la ressource. Cet état atteint, l'A.L. décide du nouvel état à atteindre en fonction des règles opératoires.

Le regroupement de plusieurs ressources de nature différente constitue un système de fabrication.

Remarque : Certaines ressources ne possèdent pas de moyen propre pour intégrer un A.L.. C'est le cas des ressources passives. Dans ce cas, l'A.L. est supporté par la fonction coordination du module "PILOTE".

* Supervision

La supervision regroupe les informations concernant l'état des ressources de production, pour informer l'opérateur de la situation de son outil de production. Ces informations sont restituées à l'état brut (ex : remontée d'un capteur de température) ou condensé (ex : statistiques de pannes).

Le rôle de l'image dans la supervision est essentiel. Il reflète la situation réelle du système de production et se doit d'être aisément interprétable.

* Conduite déportée

Nous définissons la conduite déportée comme étant l'ensemble des moyens (ex : logiciels, communications), non affectés aux ressources, qui permettent d'agir sur la conduite de celles-ci.

* Automatisme de cellule (A.C.)

Au niveau de plusieurs ressources, les règles opératoires constituent ce que nous appelons l'Automatisme de Cellule (A.C.). Cette fonction, par exemple, coordonne les actions entre le débridage d'un ensemble "palette+pièce" sur une machine et la prise de cet ensemble par un robot.

Remarque : Que ce soit au niveau de la ressource, ou au niveau de plusieurs ressources, les règles opératoires constituent le 1° niveau de réponses à la question précédemment posée.

* Décision en temps réel

La fonction décision en temps réel traite des règles de gestion. Ces règles sont utilisées pour choisir entre plusieurs actions possibles à un instant donné.

Comme nous le décrivons dans la figure précédente, ce niveau se place entre l'opérateur et l'automatisme de cellule. Dans le cas d'une gestion manuelle, ce niveau de décision est pris en charge, soit par l'opérateur, soit par la maîtrise.

Le développement de l'informatique permet d'intégrer la gestion au plus près de la fonction production. Nous verrons, ci-dessous, les divers types de décision en temps réel, et les différentes politiques de pilotage en accord avec la fonction gestion de production.

* L'opérateur

Selon notre précédent schéma, nous pourrions placer l'opérateur comme une ressource de production ; c'est le rôle de l'exécutant.

Cependant nous distinguons l'exécutant du décideur. L'opérateur complète le module de décision logiciel par réponse à des questions relevant de son domaine, ou bien, il peut se substituer à ce module lors de marches dégradées (ex : mode opérateur, marche sur défaut).

En fait, le décideur fait partie intégrante de la fonction "PILOTE". Entre autre, il décide des réactions aux perturbations ou des opérations de maintenance.

Dans certaines applications les informations provenant de la supervision sont pré-analysées par une fonction d'aide à la prise de décision (HERI-86). Cette aide assiste techniquement l'opérateur néophyte dans les actions qu'il souhaite entreprendre.

Solutions de conduite

A partir des éléments que nous venons de présenter, nous constatons qu'il existe trois possibilités de conduite. Leurs éléments constitutifs sont les suivants :

1 : Conduite manuelle

- Supervision
- Conduite déportée
- Opérateur (décideur)

2 : Conduite assistée

- Conduite manuelle
- Automatisme de cellule
- Aide à la prise de décision

3 : Conduite automatisée

- Supervision
- Automatisme de cellule

Conduite déportée
Décision en temps réel
Opérateur (décideur)

Les superviseurs industriels

En pratique, les limites entre supervision et pilotage ne sont pas clairement définies. Un superviseur peut inclure des fonctions opératoires.

D'une part, pour permettre à l'opérateur d'agir, face aux informations générées par la supervision, une fonction de conduite déportée s'adjoint au superviseur. D'autre part, le traitement automatique de règles opératoires, telles la coordination de processus, apporte "un plus" suffisant dans nombreuses applications.

Cependant, ils ne faut pas les confondre avec des outils aptes à prendre des décisions en temps réel ou susceptibles d'intégrer des fonctions de gestion de production.

Ces divers aspects font des superviseurs (ex : PCVIEW, WYZCON), des produits logiciels complets. Ils sont surtout employés dans deux situations. Soit l'installation supervisée comporte des conditions de travail néfastes à la santé des opérateurs (ex : nuisances sonores, dégagement de gaz toxiques), soit elle s'étend sur une surface importante (ex : raffinage de pétrole). Mais ceci n'est pas restrictif.

1.4 COMPOSANTES DECISIONNELLES

1.4.1 Cadre conceptuel

Une entreprise décide du lancement en production des produits vendus ou à vendre, se procure des machines, des moyens de transport, du personnel et autres ressources de production, et affecte ces ressources aux tâches à réaliser. Dans une entreprise, l'homme doit décider. A chaque niveau d'organisation d'une unité de production correspond un niveau décisionnel (DOUM-84).

La décision est l'aptitude à déterminer l'action à entreprendre, parmi plusieurs. Le jugement permettant de décider, est soumis à un critère de décision.

La méthode MRP (BOUV-86) met en évidence les niveaux décisionnels dans le domaine de la gestion de production d'une installation existante.

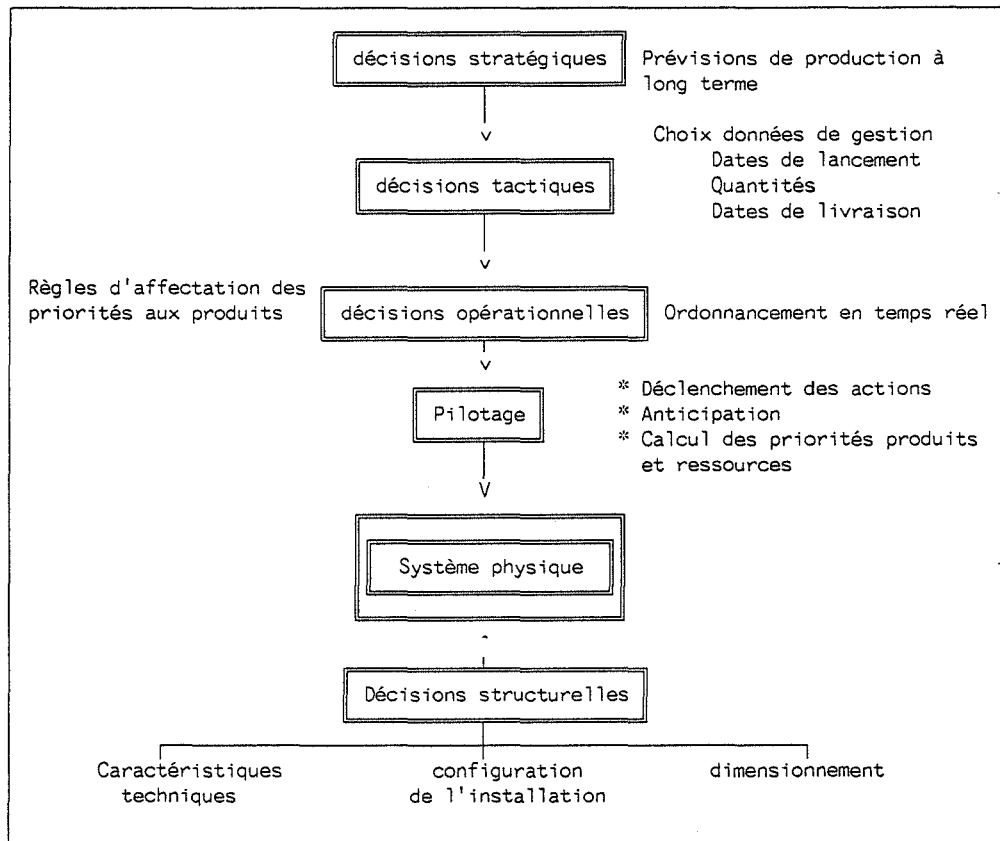


Figure 1.19: Modèle décisionnel d'une unité de production (BOUV-86)

Le modèle, présenté ci-dessus, divise la base des activités décisionnelles en modules interactifs. Ainsi, il est plus aisé de cerner les décisions à prendre, voire même d'en prendre d'autres, en les ramenant au niveau de chaque module.

De même que pour la méthode GRAI, il est possible de classifier les décisions selon deux critères ; leur nature (ex : structure, gestion, maintenance, qualité) et leur niveau d'interaction temporel avec le système physique (ex : temps réel, cours, moyen ou long terme).

En fait, les limites conceptuelles entre chaque décision ne sont pas clairement définies. Par exemple, les décisions structurelles sont étroitement liées à celles de gestion. En effet, le modèle d'organisation KANBAN influe, non seulement sur la circulation des produits, mais aussi sur les méthodes de stockage entre postes de travail.

Nous représentons le problème dans un espace de décisions. Tout déplacement dans cet espace vise à améliorer ou conserver la valeur de critères de production. Donc, à un point donné de notre espace de décision, nous pouvons attacher une valeur à chacun de nos critères, par des méthodes d'évaluation. Notons que tous les points de notre espace ne sont pas atteignables.

Décisions à long et moyen termes

Décisions techniques

- * Définition du type de production à réaliser (ex : transformation de matière, assemblage, découpe)
- * Investissements en moyens de production
 - o Choix et dimensions des installations principales
 - o Modèle d'organisation générale de la production (ex : production en ligne, par îlots de fabrication, niveau de flexibilité des moyens de fabrication)
 - o Définition des ressources annexes :
 - Humaines
 - > Qualification, Formation
 - > Fonction principale
 - > Fonctions annexes
 - Transport
 - > Manuel
 - > Traditionnel (par chariot)
 - > Réseau de chariots filoguidés
 - > Selon un modèle en îlots de fabrication

---> Suivant un système de convoyeurs

Stockage

---> Stock de matières premières

---> Stock de produits finis

---> Stockages intermédiaires

Organisation des fonctions annexes à la production

- o Politique d'approvisionnement de ressources annexes temporaires ou consommables (ex : outils, énergie)
- o Politique de maintenance (préventive, surveillance permanente, corrective)

Décisions de gestion de production

- * Définition du modèle de gestion d'entreprise le mieux adapté à la production réalisée
- * Composition du modèle de gestion en temps réel des ressources de production (ex : définition des règles de conduite d'une unité de fonderie (PIER-87)).
- * Planification de production sur les postes de charge
- * Ordonnancement de la fabrication

Nature des décisions temps réel

Les décisions que nous venons de citer sont adaptées à un cadre général de la production. Pour réaliser correctement l'adéquation des moyens de production, le responsable de production (ex : ouvrier, maîtrise ou homme méthode) prend des décisions en temps réel.

(MONT-85) détermine six classes de décision temps réel. Nous les citons ici, en les ramenant à l'objet de notre étude, c'est à dire les cellules de production.

Décisions d'affectation

Elles résultent de la flexibilité physique du système. Une pièce peut être affectée à une des ressources de fabrication, en fonction du contexte donné par l'état présent et futur du système de production (ex : gestion des flux de production, appel à la sous-traitance). Elles constituent l'ensemble des règles de gestion locales.

Décisions d'attribution

Les décisions d'attribution, que nous appelons règles d'allocation de ressources, déterminent à quelle tâche est affectée une ressource qui vient d'achever l'exécution d'un travail, ou à la fin d'une opération de maintenance (ex : choix du rôle d'une machine au sein d'un îlot, ordonnancement des tâches d'un transport, allocation d'outils aux machines).

Décisions de réactions aux perturbations

Pour réduire l'impact de perturbations sur le reste de la production, il est nécessaire, dans la mesure du possible, de prendre des décisions, baptisées réactions aux perturbations, qui permettent de réguler les flux de production, pendant et après la perturbation (ex : ré-orientation des flux par l'utilisation de décisions d'affectation, ré-ordonnancement temporaire des tâches sur la ressource après défaillance).

Décisions d'anticipation

Pour réduire les coûts de production, des décisions d'anticipation permettent d'effectuer certaines activités à un moment où le coût qui en résulte est minimum. C'est ce que nous appelons le temps masqué. Cette classe de décision est divisée en deux sous-classes selon que le produit concerné est ou n'est pas engagé physiquement dans cette décision. Par exemple, le télé-chargement d'un programme pièce, ou l'approvisionnement de magasin d'outils, ne requiert que l'information "pièce" (prochaine pièce à charger). Tandis que l'anticipation du transfert de pièce nécessite, la présence de la pièce. Ces décisions sous-entendent que les ressources associées soient disponibles.

Dans certaines applications, ces décisions, peuvent se représenter par une algorithmique automatisable.

Décisions de maintenance

Selon la politique de maintenance, édictée par les orientations à long et moyen termes de l'entreprise, l'organisation "temps réel" doit adapter les opérations d'entretien des ressources. Ces décisions sont conçues afin de perturber au minimum la production (MERC-84).

Décisions techniques

Elles établissent les méthodes d'utilisation des moyens de production. Les performances du système de production sont, avant tout, liées aux caractéristiques techniques de chaque ressource.

"Un chariot peut-il se déplacer plus vite, momentanément, pour faire face à un accroissement des demandes de déplacement ?"

"L'utilisation d'outils plus performants peut-elle accélérer la réalisation de l'opération sur une machine ?"

"La limitation des données technologiques (ex : avances outils) contribue-t-elle à la préservation des moyens de fabrication (bris d'outils) ?"

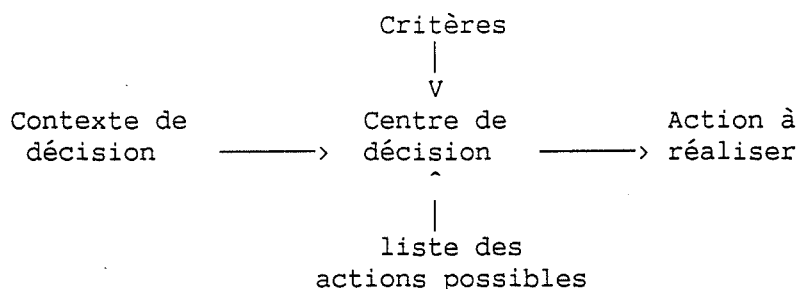
...

Un équilibre doit être établi par l'organe décideur. Il doit estimer si, par exemple, l'utilisation d'une machine à la limite de ses performances nominales, pendant un temps donné, est admissible ou nuisible à la ressource (ex : détérioration par usure plus rapide, panne, bris), aux produits (ex : retard, augmentation du risque de génération de rebuts) ou à l'ensemble du système.

Définition d'un centre de décision

Chacune de ces décisions est prise par un élément constitutif du système de production. La notion de centre de décision englobe les concepts de décision.

En première approche, nous représentons le processus de décision par la figure suivante :



Le mode de fonctionnement d'un centre de décision est régi soit par un traitement algorithmique classique, soit par des techniques déclaratives.

Remarque : Tous les centres d'information ne sont pas de type décisionnel. Un superviseur ou un serveur de données techniques ne nécessite pas cette fonctionnalité. L'organe de contrôle/commande d'une ressource possède un faible niveau de décision. Une machine peut décider de la pièce suivante à usiner en fonction de la pièce précédente, un transporteur vide, sur un réseau, peut contenir sa règle de routage. En fait, l'extension des fonctionnalités des moyens de production augmente leur autonomie, mais pas leur capacité à décider.

De façon formelle, il est possible de définir un 7-uplet (DI,A,C,H,R,LA,DU) pour la représentation des décisions (PIER-87). Rappelons la définition de ce 7-uplet :

- DI : Données initiales (état du système, cadre de décision)
- A : Ensemble des actions de pilotage pouvant être sélectionnées à l'issue de l'activité de décision
- C : Condition de déclenchement de l'activité de décision
(Événement donné, période de décision, événement déclenchant)
- H : Horizon de décision
(Durée de validité de la décision, peut correspondre à une plage de temps donné, ou jusqu'à la date d'un événement déclenchant)

- R : Ressources nécessaires à l'activité de décision
- LA : Logique de décision
- DU : Durée de l'activité décisionnelle

Nous proposons, ci-dessous, une mise en oeuvre de ce formalisme dans le cas de la cellule flexible de production.

1.4.2 Le centre de décision "PILOTE"

"PILOTE" intègre un bloc décisionnel qui regroupe les décisions opérationnelles.

Nous définissons comme opérationnelles, les décisions appliquées sur le niveau opératoire. C'est une boîte noire qui contient les décisions en temps réel. Nous l'appelons aussi gestion en temps réel, puisque son objectif est de gérer correctement les ressources et les flux de la cellule de production.

Sont classés, en tant que décisions opérationnelles, les choix d'affectation, d'attribution et d'anticipation. Dans une certaine mesure, les décisions de réaction aux perturbations sont incluses dans cet ensemble.

Nous laissons, actuellement, au *décideur* les choix de maintenance et les choix techniques.

La gestion en temps réel d'un système de production est liée à un centre de décision. Son but est de déterminer l'action à réaliser à un instant donné, dans un contexte connu. Ce dernier s'établit selon l'état actuel des ressources et du carnet de commandes. L'emploi de critères justifie le choix entre deux actions conflictuelles.

Les décisions prises sont qualifiées d'opérationnelles. Elles déterminent les ressources à employer et les produits à transformer. Etant opérationnelles, elles sont appliquées au système sans risque de conflit. Pour éviter ces conflits, il est indispensable que chaque ressource ou matière soit suivie au plus près.

Deux méthodes de prise de décision sont employées simultanément. La première traite les conflits en déclenchant les actions dès que les acteurs de cette action sont disponibles. C'est la méthode du Premier Arrivé/Premier Servi. Tout au plus, une priorité dite commerciale est affectée aux produits.

Ce mode de gestion risque d'engendrer un surdimensionnement des ressources, pour réaliser la production en temps voulu. Cette démarche est justifiée pour certaines ressources telles que les outils. Elle l'est moins si elle implique des situations difficiles à gérer.

Pour faire face à ces défauts, la gestion doit allouer les ressources selon des lois qui exploitent au plus juste, le système de production. Ces lois établissent une base algorithmique le plus souvent heuristique.

Dans un système temps réel de type cellule flexible, nous détectons trois sous-niveaux de décision :

- D0 : Décisions engageant une action physique immédiate
- D1 : Décisions visant au maintien des performances de production
- D2 : Décisions de réaction aux perturbations

Les conflits majeurs à traiter sont liés aux décisions d'affectation et d'attribution. Pour une cellule flexible, la classe de décision D0 se subdivise en cinq éléments :

- D01 : Choix d'une pièce parmi N en lancement de production
- D02 : Choix entre N pièces différentes pour charger une machine
- D03 : Choix entre N machines pour transformer une pièce
- D04 : Sélection d'un déplacement parmi N à allouer à un transporteur
- D05 : Choix d'affectation des ressources annexes à une ressource principale ou à une pièce

D01 et D02 pourraient être regroupées en une seule décision, cependant, dans le cas d'une cellule, chacune d'elles peut être traitée par des organes différents. D'autre part, elles sont, de par nature, très différentes. En effet, D01 entraîne l'introduction de nouvelles entités dans le système, tandis que D02 vise à réguler les flux au sein du système.

Composition des contextes de décision

Un contexte est, comme nous l'avons cité, le regroupement des états actuels des ressources de production. Il se scinde en éléments DI* et C*, selon le formalisme précédent.

Nous pouvons en énumérer les composantes pour chaque type de ressource, ou pour les produits.

Produit : Date et quantité d'approvisionnement matière

Machine : Disponibilité

- En cycle de fonctionnement
- En arrêt
- En panne
- En attente

Outil : Présence de l'outil dans le magasin d'outils à considérer

Stock : Pour un emplacement : libre / occupé

Pour tout un stock : nombre d'emplacements occupés
nombre d'emplacements disponibles

Transport : Libre / occupé

Position dans la cellule
En panne

Palette : Quantité de palettes libres

Lieu de positionnement
Montage présent sur la palette

Montage : Quantité de disponible par type

Prenons l'exemple de la prise d'une pièce par le transporteur. Le contexte nous indique si l'emplacement où se trouve la pièce est accessible, et si le transporteur est disponible pour prendre cette pièce. De même, il précise si la destination est elle-même, disponible.

Variables de performances

Pour établir les performances d'un système de production, les auteurs utilisent un ou plusieurs indicateurs. Par exemple, ils prennent en compte les taux d'occupation machines, les temps de cycle moyen des pièces, ou le temps total de réalisation d'une production.

En fait, la pertinence de l'un ou de l'autre des indicateurs est à rapporter à leur poids respectifs dans la composition des coûts de production. Cependant, certaines notions telles que la satisfaction des clients, s'éloignent de celles du coût total.

Nous avons retenu deux classes de variables ; celles liées aux ressources, et celles liées aux produits. La liste suivante indique chaque indicateur utilisé et la raison de son emploi.

* Taux d'engagement des ressources

A rapporter au taux de charge prévu, un taux d'engagement élevé diminue la part des coûts de non fonctionnement de la machine.

* MAKESPAN

Ou temps total de réalisation d'une production donnée, le Makespan indique globalement si "le maximum de pièces a été réalisé dans le minimum de temps". C'est un indicateur des performances de l'ordonnancement des tâches.

* Temps de cycle des pièces

C'est le temps total de passage des pièces sur un ensemble de moyens de production. Dans notre cas, c'est l'écart entre la date d'entrée et celle de sortie de la cellule de production.

L'étude des temps de cycle doit être accompagnée, si possible, de celle de leurs écarts types. Cette analyse indique si une majorité ou non de pièces a un temps de cycle proche de la moyenne.

L'intérêt de cette approche, outre l'évaluation des en-cours de production, réside dans l'analyse du comportement *anarchique* ou non du système. Des temps de cycle, variant considérablement, empêchent de maîtriser correctement les flux de production, et par là même, d'indiquer au client une date de livraison. A l'opposé, des temps de cycle variant peu, permettent de satisfaire la demande clientèle.

L'analyse des temps de cycle est le moyen le plus efficace d'aborder qualitativement la flexibilité d'un système de production.

Remarque : Nous préférons l'étude des temps de cycle à celle des retards des pièces par rapport à une date de livraison. Elle permet de mieux analyser les flux de production.

Dans la réalité, l'étude des retards et des avances est souhaitable, puisqu'elle intègre la notion de satisfaction clientèle.

Ressources supports

Les ressources nécessaires (R) aux activités décisionnelles D0, D1 et D2 pour le cas d'une cellule flexible, sont désignées de la façon suivante :

CPU0 : Moyens d'automatisation liés aux ressources

(ex : API, CN, Capteurs, Actionneurs)

CPU1 : Moyens de pilotage liés à un ensemble de ressources

(PC de contrôle d'îlot)

CPU2 : Moyens support des décisions D1 et D2, peuvent être inclus ou associés à CPU1

HUM0 : Opérateurs décideurs

HUM1 : Gestionnaires de production

MAI0 : Responsable de maintenance.

D'autre part, les durées (DU) sont immédiates pour la classe D0 (quelques secondes), puisque ce sont des décisions dites temps réel. La classe D2, précédée d'une marche dégradée des moyens de fabrication, a une durée plus longue en fonction de la gravité de la perturbation. Finalement, la classe D1, qui dépend des temps de réaction de CPU2 et HUM0 ou HUM1, et

qui nécessite la constitution d'un historique, prend plus de temps pour être générée.

1.5 GESTION DES PRODUITS

La gestion des produits pourrait se résumer à l'aide des décisions :

D01 : "Choix de la pièce à lancer"

D02 : "Choix de la pièce à transformer"

La logique associée pourrait provenir d'un système de gestion de production, dans lequel les fonctions ordonnancement et lancement indiqueraient l'ordre de passage des produits sur chaque ressource.

Cependant, dans le cas d'une cellule, il est aussi possible d'appliquer une logique basée sur des règles locales d'affectation de priorités (cf. Annexe B).

Nous découvrons plusieurs familles :

- * Règles liées au contexte technique (FIFO, LIFO..)
- * Règles introduisant le mode d'élaboration du produit (SPT, MOPNR...)
- * Règles introduisant la notion de flux de production (Winq, Xwinq...)
- * Règles prenant en compte le délai de livraison (Edd, Slack...)

Le choix de l'une ou l'autre règle doit donc faire l'objet d'une analyse complète du système.

Les tableaux définissent les 7-Uplets associés aux décisions D01 et D02.

Table 1.3: D01 : Choix d'une pièce, parmi N, au lancement

D01	
DI01	Etat d'avancement du planning de production Contraintes commerciales (date de livraison, priorité externe) Mode d'élaboration du produit, ressources nécessaires Etat de disponibilité des ressources, configuration de la cellule Niveau d'engagement des ressources
A 01	Requête de ressources annexes associées à la pièce à lancer Introduction d'une pièce parmi N
C 01	Date de lancement arrivée à échéance Disponibilité des moyens nécessaires au lancement
H 01	Fin de l'exécution du lancement de la i ^o pièce Date de lancement d'une pièce plus prioritaire atteinte
R 01	CPU0, CPU1, HUM0, HUM1
LA01	a) Application d'une règle locale d'affectation de priorité au lancement (Due-Date, Setup, Priority ..) b) Suivi du lancement de production c) Algorithme de recherche d'un lancement optimum

Table 1.4: D02 : Choix entre N pièces pour charger une machine

D02	
DI02	Etat d'avancement de chaque pièce Liste des pièces à trier Contraintes commerciales (date de livraison, priorité externe) Mode d'élaboration du produit, ressources nécessaires Etat de disponibilité des ressources, configuration de la cellule
A 02	Déplacement d'une pièce vers une ressource donnée (cf D03) Engagement d'une machine par une pièce donnée
C 02	Ressources disponibles Décision d'anticipation
H 02	Début de transformation de la pièce sélectionnée
R 02	CPU0, CPU1, HUM0, HUM1
LA02	a) Application d'une règle locale d'affectation de priorité aux moyens de stockage (Due-Date, slack, Priority ..) b) Suivi d'un ordonnancement de production

1.6 GESTION DES POSTES DE TRAVAIL

Le contrôle des flux de production peut se faire par action sur les produits, mais aussi par routage de ces produits vers les machines. Cette

gestion des postes de travail peut être réalisée soit par affectation statique de priorité, soit par recherche de poste goulot et d'équilibrage des flux, soit par des règles de gestion locale telles Winq (Cf. Annexe 2).

Le tableau suivant présente le modèle de décision lié aux postes de travail.

Table 1.5: D03 : Choix entre N machines pour transformer une pièce

D03	
DI03	Performances technologiques de la machine Liste des N machines à sélectionner File d'attente généralisée de chaque machine Disponibilité de chaque machine Implantation physique
A 03	Déplacement d'une pièce vers une ressource donnée (cf A02) Engagement d'une machine par une pièce donnée
C 03	D01 décision de lancement d'une pièce D02 décision de transformation d'une pièce
H 03	Fin de chargement de la machine sélectionnée
R 03	CPU0, CPU1, HUMO, HUM1
LA03	Règle locale de sélection d'un serveur (Winq, Xwinq ...) Application de priorités utilisateur Algorithme de répartition des charges Suivi d'un ordonnancement de production

1.7 GESTION DES RESSOURCES ANNEXES

Nous remarquons qu'une faible inter-dépendance des systèmes de production amène une facilité de gestion. Certains principes de pilotage sont associés à cette idée. Outre le contrôle de la disponibilité des ressources annexes, deux aspects doivent être traités :

- l'anticipation
- l'affectation.

Le cadre conceptuel de ces décisions est présenté ci-dessous.

Table 1.6: D05 : Choix d'affectation d'une ressource annexe

DI05	Disponibilité de la ressource considérée Requêtes d'affectation de cette ressource Priorité de chaque requête	D05
A 05	Affectation d'une ressource à un produit Affectation d'une ressource à une machine	
C 05	Décisions D01 à D03 déclenchées	
H 05	Fin de l'exploitation de la ressource	
R 05	CPU0, CPU1, HUM0	
LA05	Affectation à la requête de priorité maximum	

1.7.1 Ressources liées aux produits

* Anticipation

Dans le cadre de notre étude, les ressources liées aux produits se limitent aux systèmes support de pièces (palettes et montages). Les règles d'anticipation, dans ce cas, se traduisent par les propositions suivantes :

- " Palettes et montages sont amenés avant que le produit soit en début de cycle de montage"
- " Après le démontage d'une pièce, si possible, on enchaîne par le montage d'une pièce de même type ou similaire"

* Affectation

L'affectation d'un support pour l'une au l'autre des pièces, est induit par le choix de la pièce à introduire dans la cellule.

1.7.2 Ressources liées aux machines

L'anticipation concernant les ressources liées aux machines, i.e. programmes pièces et outils, est réalisable (HAMM-87). L'information essentielle est l'identification de la prochaine pièce. Cette information peut être issue d'un ordonnancement préalable, ou découler de l'état actuel des pièces lancées en fabrication.

Programmes pièces

Le téléchargement d'un programme pièce est exécuté de diverses manières selon les capacités de la commande numérique (C.N.) associée au moyen de production. Si une bibliothèque est supportée au sein de cette C.N., alors le téléchargement peut être masqué et commandé par le processus associé à la machine (semi-autonome) ou par "PILOTE". Si la C.N. contient au maximum un programme pièce, voire moins, alors les applications de type D.N.C. (Direct Numerical Control) associent l'ordinateur contenant la base de données techniques pour étendre les capacités de la C.N. (RAMS-89) (HAMM-87).

Les outils

En parallèle des solutions techniques, nous voyons apparaître divers modes de gestion des outils :

- a) **configuration figée** : la gestion d'outils est ramenée à celle du remplacement des outils défectueux. Cette solution est la mieux adaptée à l'anticipation. Elle est admissible dans le cas où les magasins contiennent tous les outils nécessaires. Cependant, elle permet difficilement le contrôle d'outils en cours d'usinage ou l'échange entre machines.

Cette solution risque de diminuer la flexibilité de la cellule s'il est nécessaire de changer les outils présents dans les magasins pour réaliser des produits différents.

- b) **configuration interchangeable** : la reconfiguration du magasin est traitée avant chaque changement de série.

Cette solution rapide entraîne une gestion complémentaire des changeurs. Elle convient à des productions de petites séries qui utilisent, pour chaque série, des outils totalement différents. Néanmoins, elle augmente le nombre d'outils - puisque d'un changeur à l'autre certains d'entre eux sont ré-employés - et alourdit la gestion associée.

L'anticipation peut nécessiter la mise en oeuvre d'un second magasin au pied de la machine (GIRA-82).

Cette solution complexe semble être délaissée actuellement.

c) configuration flexible : dans ce cas, la gestion des outils peut être prise en charge par "PILOTE" ou la machine. Etudions ces deux cas :

Gestion "PILOTE" : soit "PILOTE" approvisionne tous les outils nécessaires à la phase d'usinage lors d'un cycle de préparation de machine, soit il les apporte uniquement lors des sous-phases les concernant.

Cette seconde solution augmente la disponibilité des outils, mais nécessite une gestion sophistiquée, car "PILOTE" doit s'informer des début et fin des sous-phases.

Dans les deux cas, une anticipation peut être envisagée. Elle consiste à apporter les outils juste avant le début d'une phase ou sous-phase.

Gestion machine : l'automatisme local, associé à la machine, constitue alors un centre de décision.

Lors du téléchargement de programme, "PILOTE" fournit les codes des outils associés. Ces codes peuvent être directement inscrits dans le programme. La machine vérifie la présence de ceux-ci avant la réalisation d'une sous-phase d'usinage. Dans le cas contraire, elle les approvisionne dans la limite de ses capacités. Ces opérations peuvent être réalisées en temps masqué.

Dans ce cas, la flexibilité de la cellule est accrue.

Affectation : dans le cas d'une configuration flexible, "PILOTE" affecte, en temps réel, chaque outil aux machines. Ceci se fait en fonction des priorités des tâches associées.

Ressources consommables : les outils étant des ressources consommables, il faut prévoir des échanges entre les machines et "PILOTE" afin de suivre leur état de consommation (ex : durée de vie).

Opérateurs *exécutants*

La gestion d'un opérateur *exécutant*, c'est à dire nécessaire à la réalisation d'une opération sur un poste de travail, peut être réalisées de différentes manières selon la durée de l'opération.

Il peut être affecté momentanément sur une machine. Si plusieurs machines le demande, alors, tout comme les outils, "PILOTE" l'affecte en fonction des priorités des tâches associées.

Il peut être affecté pour une durée déterminée sur une machine quelle que soit l'activité de celle-ci. Cette affectation se fait, non plus par "PILOTE" mais par une affectation à moyen ou long terme à une machine.

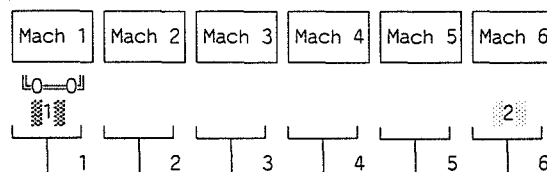
1.8 GESTION DU TRANSPORT

Dans certaines applications, la ressource de transport nécessite une gestion spécifique, pour desservir rapidement les machines ou diminuer l'effet goulot qu'elle engendre.

Nous proposons dans ce chapitre, différentes méthodes de gestion de transporteur. La validation de ces méthodes est proposée ultérieurement sur un cas d'application.

Exemple introductif

Pour illustrer notre exposé, nous proposons d'appliquer chaque approche à un cas simple de manutention.



Problème : * La ressource de transport se situe devant le poste 1

----- * La pièce 1 doit aller sur la machine 3

* La pièce 2 doit aller sur la machine 5

* La pièce 2 est prioritaire sur la pièce 1
(effet d'une règle de gestion sur les pièces)

* Durée des trajets (en secondes)

Machines	1	3	5
Pièce 1	30	30	80
Pièce 2	90	60	20

Question : quel trajet doit effectuer la ressource de transport ?

1° solution : Choix par classe de déplacement

Supposons que nos classes de déplacement impliquent que nous chargions nos machines selon l'ordre de numérotation. Le trajet que va effectuer la ressource de transport est le suivant :

Mach 1 -> Pièce 1 -> Mach 3 -> Pièce 2 -> Mach 5

Durée : 140 Sec

2° solution : Choix par priorité aux produits

Le produit 2 circule avant le produit 1. Le trajet que va effectuer la ressource de transport est donc différent :

Mach 1 -> Pièce 2 -> Mach 5 -> Pièce 1 -> Mach 1

Durée : 210 Sec

3° solution : Recherche d'un trajet optimum

Le deux solutions précédentes sont scrutées et la plus favorable est sélectionnée. Si notre critère de jugement est le temps, alors la pièce 1 est desservie la première (1° solution).

Dans notre cas de figure, la 1° solution n'aboutit pas à une solution optimale, puisque, la classe de déplacement pourrait très bien classer les

machines par ordre décroissant, alors la pièce 2 est servie la première. Seule la 3^e solution apporte une solution optimum.

Cet exemple illustre la nécessité de gérer efficacement la ressource de transport. Nous allons aborder ce problème maintenant.

L'ensemble instantané des déplacements E_t

A un instant donné t , le transporteur est susceptible de réaliser un ensemble de déplacements E_t^0 .

Dans une cellule, ces déplacements sont de trois types :

- Déplacement d'une palette chargée d'une pièce
- Déplacement d'une palette vide
- Déplacement à vide

Un déplacement i est caractérisé par :

Sa provenance : $p_i \in \tilde{A}$
Sa destination : $d_i \in \tilde{A}$
Son type : T_i
Sa date au plus tôt : K_i

\tilde{A} est l'ensemble fini des positions autorisées ; il est défini par la position physique de chaque lieu d'accès aux postes de travail et aux postes de stockage.

L'ensemble des déplacements E_t^0 est constitué des quadruplés réalisables à l'instant t

$$E_t^0 = \{ \Omega_i = (p_i, d_i, T_i, K_i) \mid K_i \leq t \}$$

Réduction/Extension de E_t^0

E_t^0 est réduit par la suppression des déplacements ayant la même provenance ou la même destination. Cette simplification est exécutée en utilisant les priorités des pièces concernées. Priorités affectées par

l'ordonnancement prévu des tâches sur les machines, ou par l'emploi de règles locales.

E_t^0 est étendu lorsque nous admettons l'anticipation des déplacements. Soit δt_a le délai d'anticipation autorisé. Alors E_t^0 a la forme suivante :

$$E_t^0 = \{ \Omega_i = (p_i, d_i, T_i, K_i) \mid K_i \leq t + \delta t_a \}$$

L'estimation de δt_a est soumise à l'appréciation du responsable de gestion. Une valeur, même minimale, accélère le processus d'approvisionnement de machines en pièces. Cependant, trop élevée, elle peut entraîner des blocages excessifs pour les transferts non concernés.

Nota : Rappelons que l'anticipation est soumise, en premier lieu, aux contraintes techniques du système. Ainsi, elle n'est pas justifiée systématiquement.

Si les postes de travail contiennent des postes tampons en entrée, alors l'anticipation est intrinsèque aux déplacements visant à approvisionner ce poste.

Si le système de transport dispose d'un préhenseur unique, alors elle implique une extension de E_t^0 moindre. Seuls les déplacements à vide, pour évacuer une machine, sont anticipés.

Allocation par niveaux d'actions prioritaires

Une méthode naturelle d'allocation des ressources de transport consiste à traiter chaque déplacement i selon son niveau de priorité.

Nous supposons, au préalable, que E_t^0 a été réduit et, si nécessaire, étendu par l'anticipation.

* Priorité à l'action liée au déplacement

Les actions qui impliquent l'utilisation du moyen de transport sont classées par priorité. Ce classement s'édicte sous la forme de propositions :

" Favoriser les déplacements de pièces à ceux de palettes vides à ranger"

" Donner priorité à l'évacuation puis au chargement de machine"

" Utiliser le moins fréquemment les moyens de stockage"

Il en résulte une division de l'ensemble E_t^0 en classes de déplacements traitées successivement. Pour deux déplacements de même classe, un conflit subsiste. Il est résolu en appliquant une règle de gestion locale associée à la classe de déplacements.

Le tableau suivant présente un exemple de ce mode d'affectation de priorités.


Table 1.7: Priorités aux actions

	Déplacement de palette			Déplacement de pièce simple accès			Déplacement de pièce double accès		
	Machine	Stock tampon	Poste fixe	Machine	Stock tampon	Poste fixe	Machine	Stock tampon	Poste fixe
Machine	23	23	3	20	19	14	20		14
Stock tampon	23	23	2	18	17	13			
Poste fixe	21	21		16	15		19		

Commentaires : L'action la plus prioritaire est réalisée en premier. Dans ce tableau, on essaye de transférer des palettes de machine à machine pour, introduire des pièces, avec une autre action.

Les cases hachurées indiquent des actions irréalisables.

Les actions à même niveau de priorité sont traitées par affectation d'une priorité au type d'action en fonction de la pièce à transporter.


 Pour introduction de pièce

Ce mode d'affectation est suffisant dans certaines applications où les temps de transport sont faibles en comparaison avec les temps opératoires. L'anticipation peut être employée.

* Priorité à la durée de déplacement

Une seconde méthode d'allocation du transport consiste à employer des règles locales de gestion applicables à ce problème. Vis à vis de la durée

de déplacement nous retenons les règles SPT, LPT et celles qui en découlent par pondération avec d'autres règles (ex : SPT/WORK, SPT/MWKR).

Le temps de déplacement est calculé pour que nous lui imputions les temps de trajet à vide.

Soit P_0 la position du transporteur à l'instant t considéré

Soit $H(P_i, P_j)$ le temps physique de déplacement entre deux positions quelconques P_i et P_j .

Le temps, H_i , alloué au déplacement Ω_i , s'exprime selon

$$H_i = H(P_0, p_i) + H(p_i, d_i) \quad (\text{f 1.1})$$

Pour exemple, la loi SPT, Shortest Processing Time, appliquée au transport, sélectionne le déplacement dont le H_i est minimum.

* Priorité à la pièce

Comme nous venons de le voir, nous pouvons affecter une priorité à la pièce selon une règle de gestion locale. Les règles fondées sur une affectation de priorité à la pièce possèdent les mêmes méthodes de calcul que lors du choix dans une file d'attente.

Remarque : Les méthodes, qui donnent priorité aux type d'action, sont dites orientées "Process", à l'opposé de celles orientées "transport". Celles-ci peuvent dégrader l'utilisation souhaitée des ressources de transformation. Une solution mixte consiste à appliquer préalablement la division par classes de déplacements de E_t^0 , comme nous venons de le voir.

Allocation selon optimum

L'ensemble E_t^0 peut être traité en globalité par une recherche d'un ordonnancement que nous qualifions d'optimum. Pour évaluer cette optimalité, nous déterminons un critère associé à cet ordonnancement.

Cet ordonnancement, pour être employé en temps réel, doit traiter un minimum de déplacements à un instant t . Pour commencer, nous considérons

que E_t^0 est réduit comme cité ci-dessus, tout en prenant en compte l'anticipation.

D'autre part, nous voyons, en répondant aux contraintes pré-établies, qu'il est possible d'élaborer un *squelette* de l'ordonnancement.

* Critères

Deux critères ont été fixés. Ils visent, respectivement, la minimisation du *temps total de transport* (Critère CK^1), et celle de l'*attente du transporteur* (Critère CK^2). Le calcul de ces critères est le suivant :

N : nombre de déplacements de E_t^0

$N = \text{Card}(E_t^0)$

$d_0 = P_0$ position du transporteur à l'instant t .

$$CK^1 = \sum_{i=1}^{i=N} [H(d_{i-1}, p_i) + H(p_i, d_i)] \quad (f \ 1.2)$$

\downarrow
 déplacement
à vide

\downarrow
 déplacement
en charge

$$CK^2 = \sum_{i=1}^{i=N} [H(d_{i-1}, p_i) + (N-i) * (H(d_{i-1}, p_i) + H(p_i, d_i))] \quad (f \ 1.3)$$

\downarrow
 attente du
déplacement Ω_i

\downarrow
 attente des $N-i$
déplacements restants

Nota : Lorsque nous comparons deux ordonnancements de l'ensemble E_t^0 , à un instant t donné, la relation (f 1.2) se simplifie par suppression des déplacements en charge, ce terme restant constant.

$$CK^1 = \sum_{i=1}^{i=N} H(d_{i-1}, p_i) \quad (f \ 1.2 \text{ bis})$$

La même remarque est possible pour CK^2 , elle permet de supprimer le terme $N * H(p_i, d_i)$.

* Contraintes techniques

L'ordonnancement est contraint techniquement par l'obligation d'exécuter certains déplacements avant d'autres. Par exemple, dans le cas d'un système affecté d'un seul préhenseur, nous devons évacuer la pièce présente sur une machine, sans stock, avant de recharger celle-ci.

Ces contraintes constituent un ensemble de couples de déplacements (Prédécesseur, Successeur). Lors de la création d'un ordonnancement, nous vérifions si ces couples sont respectés.

Nous recherchons les couples de déplacement (p, s) dont la provenance p_p correspond à la destination d_s .

$$E_t^1 = \{ (p_i, s_i) \mid p_{p_i} = d_{s_i} ; p_i, s_i \in E_t^0 \}$$

* Phénomène de "cascade"

L'intérêt d'un système de préhension double réside dans l'échange de pièces sur une machine. Ceci diminue les déplacements à vide par phénomène de "cascade". Il en résulte une annulation du terme $H(d_{i-1}, p_i)$ des expressions (f1.2) et (f1.3).

Nous pouvons constituer un ensemble de n-uplets, ou cascade, de déplacements répondant à ce phénomène. Pour chaque élément d'un n-uplet, nous vérifions que sa provenance, p_j , correspond à la destination de son prédécesseur, d_{j-1} . Nous obtenons l'ensemble $E_t^{1'}$.

Soit m_i le nombre d'éléments de la cascade i .

$$E_t^{1'} = \{ (\Omega_1^i, \dots, \Omega_{m_i}^i) \mid d(\Omega_{j-1}^i) = p(\Omega_j^i); j=2, m_i ; \Omega_j^i \in E_t^0 \}$$

Il est possible de réduire virtuellement l'ensemble E_t^0 en substituant les "cascades" par un déplacement unique. C'est l'ensemble E_t^{0*} dont les éléments décrivent chaque cascade i par :

Sa provenance : $p'_i \in \tilde{A}$
 sa destination : $d'_i \in \tilde{A}$
 La description du n-uplet $(\Omega_1^i, \dots, \Omega_{m_i}^i)$

Le temps de déplacement en charge d'une cascade i est calculé comme suit :

$$H^*(p'_i, d'_i) = \sum_{j=1}^{j=m_i} H(p_{\Omega j}^i, d_{\Omega j}^i) \quad (f \ 1.4)$$

De même, les relations (f 1.1) à (f 1.3) sont modifiées :

$$H_i^* = H(P_0, p'_i) + H^*(p'_i, d'_i) \quad (f \ 1.5)$$

Soit N' le nombre de déplacements de E_t^{0*}

$$N' = \text{Card}(E_t^{0*})$$

Nota : $N' \leq N$

$d'_0 = d_0$, Position du transporteur à l'instant t .

$$CK^1 = \sum_{i=1}^{i=N'} [H(d'_{i-1}, p'_i) + H^*(p'_i, d'_i)] \quad (f \ 1.6)$$

$$CK^2 = \sum_{i=1}^{i=N'} [H(d'_{i-1}, p'_i) + (N-i) * (H(d'_{i-1}, p'_i) + H^*(p'_i, d'_i))] \quad (f \ 1.7)$$

Nota : Comme nous l'avons vu précédemment, la relation (f 1.6) peut être simplifiée. Nous obtenons :

$$CK^1 = \sum_{i=1}^{i=N'} H(d'_{i-1}, p'_i) \quad (f \ 1.6 \text{ bis})$$

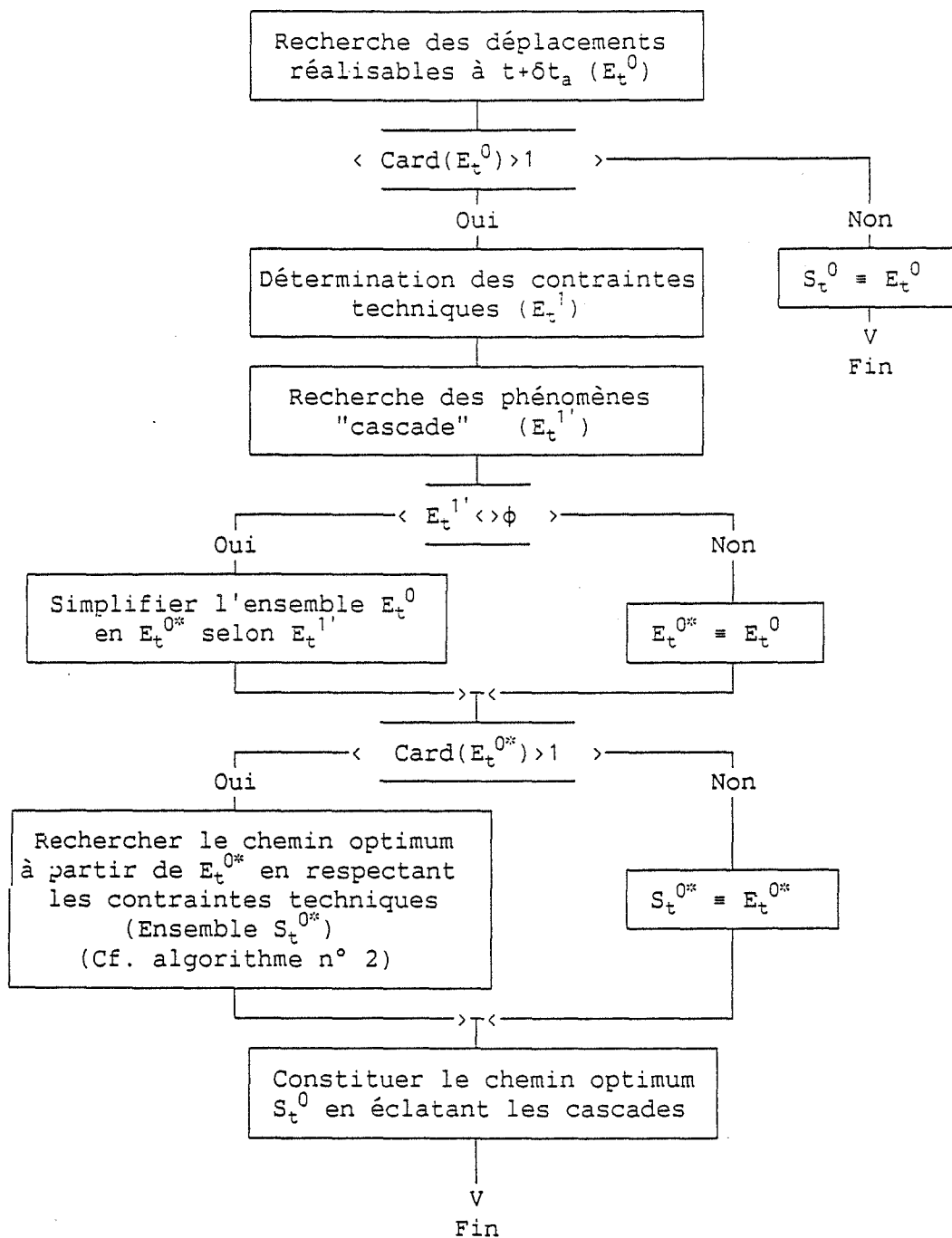
* Notion de chemin

Nous appelons *chemin* l'ensemble ordonnancé S_t^0 admissible, au sens des contraintes techniques, des déplacements contenus dans E_t^0 .

Un chemin optimum est celui qui optimise un critère CK^j donné.

* Algorithme n° 1 : mise en oeuvre

La mise en oeuvre de la recherche du chemin optimum est établie de la manière suivante, dès que le transporteur est disponible :



Lorsque nous obtenons S_t^0 , non vide, nous déclenchons le premier déplacement associé.

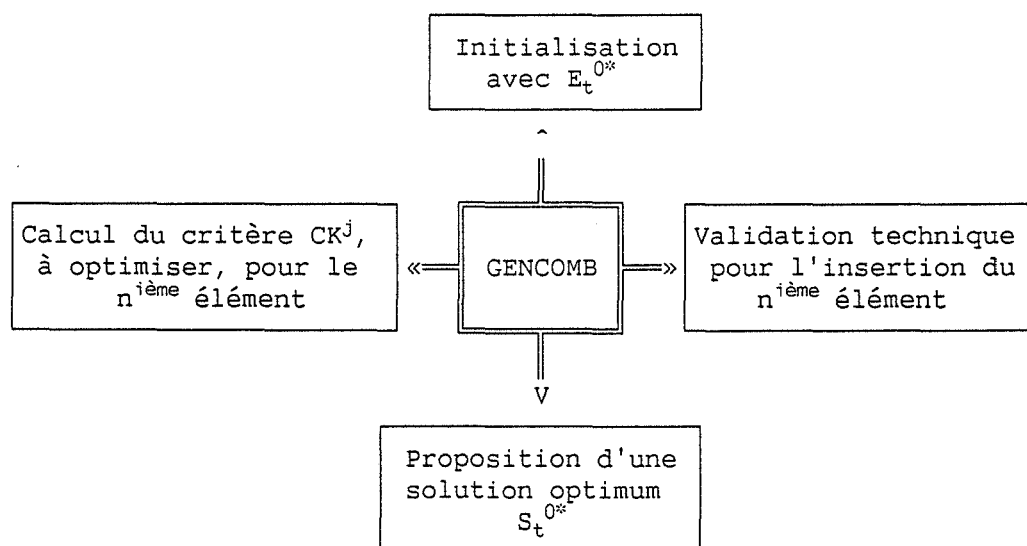
* Algorithme n° 2 : recherche d'un trajet optimum

La recherche d'un chemin optimum de E_t^{0*} est faite selon une méthode de type Séparation et Evaluation Progressive (S.E.P.). Nous constituons une solution par ajout d'un élément à un chemin partiel, puis nous évaluons sa validité (technique et optimale), avant de passer à l'élément suivant.

Toutes les solutions sont prospectées car les trajets à vides ne sont pas connus à priori.

GENCOMB est la fonction qui permet de générer toutes les combinaisons des N' déplacements de E_t^{0*} . Elle possède trois points d'entrée :

- Initialisation de l'algorithme
- Validation technique d'une solution lors de l'ajout du $n^{\text{ième}}$ élément.
- Validation selon le critère choisi.



Validation technique : Elle est réalisée, lorsque notre système de transport possède un seul préhenseur, par la vérification qu'aucun prédécesseur du $n^{\text{ième}}$ élément ne le succède.

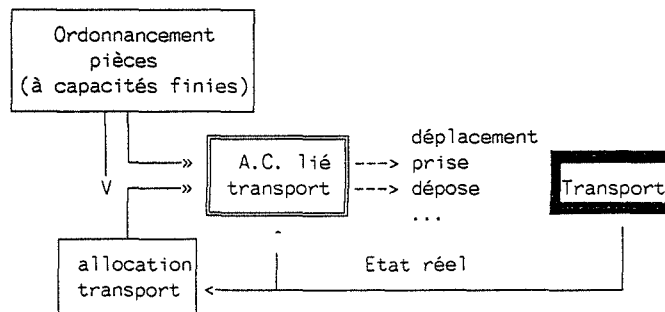
Algorithme :

Soit S' le chemin complet en cours d'évaluation
Soit β le $n^{\text{ième}}$ élément de S'
Soit S'' l'ensemble des $N'-n$ éléments non ordonnancés
Pour chaque couple (p_i, s_i) de E_t^1
 Si $\beta = s_i$ alors
 Vérifier que p_i n'appartient pas S''

* Déviation de la solution : comportement face aux aléas

L'algorithme d'allocation, que nous venons de présenter, fournit une solution qui n'est pas automatiquement respectée. La prise en compte partielle des futurs déplacements, dans E_t^0 , est une cause de ce phénomène. Par exemple, un transfert d'un poste de travail vers un poste de stockage peut se substituer à un chargement de machine devenue disponible.

Le système de transport comprend ses propres règles de pilotage pour réaliser les déplacements en charge et prendre des mesures élémentaires face à un aléa. Il "consulte" l'algorithme uniquement lorsqu'il est rendu disponible (vide). La figure suivante rappelle cette organisation.



A.C. : Automatismes de Cellule (partie transport)

Figure 1.20: Pilotage & gestion d'un système de transport

Ce mode de traitement ramène le système, dans le cas d'aléas, à une situation classique. Seul l'état actuel, modifié par l'aléa, est pris en compte pour prendre une décision.

* Tableau récapitulatif

Comme nous l'avons réalisé précédemment, l'organisation des décisions associées à la fonction transport se représente par un 7-Uplet dont les composantes sont :

Table 1.8: D04 : Sélection d'un déplacement parmi N

DI04	Liste des déplacements à réaliser (Générée par D01, D02, D03 & D05) Etat de disponibilité de la ressource de transport Configuration physique	D04
A 04	Réalisation d'un déplacement donné	
C 04	Transport libre Moyen lié aux N déplacements disponibles	
H 04	Fin d'exécution du déplacement	
R 04	CPU0, CPU1	
LA04	Règle locale de sélection d'un déplacement Application de priorités utilisateur Traitement par priorité aux classes de déplacement Algorithme d'optimisation des déplacements	

1.9 DECISIONS COMPLEMENTAIRES

Nous avons vu les décisions de type D0. Dans un contexte plus global, nous intégrons les niveaux D1 et D2. Ceux-ci agissent sur la logique de décision (LA) de la classe D0. Ainsi, nous avons proposé plusieurs logiques (LA) liées à la même décision D0. Ci dessous, deux tableaux représentent un modèle des centres de décision associés aux choix D1* et D2*.

Table 1.9: D1* : Décisions visant le maintien des performances

	D1*
DI1*	Avancement et réalisation du planning de production Charges de production en cours et en prévision Engagement réalisé des ressources Disponibilité des ressources (ex : arrêt prévu) Base de données historiques sur les effets des logiques LA0*
A 1*	Actions sur LA0* par modification ou substitution
C 1*	Dégradation des performances envisagées Anticipation sur les disponibilités des ressources Modification notable des charges de production
H 1*	Horizon variable en fonction de l'analyse des indicateurs de performances Horizon fixe ou pré-établi si fonction des disponibilités
R 1*	CPU1, CPU2, HUM0, HUM1
LA1*	a) Troncatures statiques entre diverses règles locales b) Applications de techniques expertes (logique LA* choisie selon un raisonnement expert avec application de coefficients de certitudes évalués suivants les performances prévues ou observées) (WU -88) (PIER-90) (BES0-90)

Table 1.10: D2* : Décisions de réactions aux perturbations

	D2*
DI2*	Même contexte que DI1* Gravité de la perturbation Conséquences de disponibilité des ressources liées à la perturbation
A 2*	Actions sur LA0* par modification ou substitution Déviation des flux de production Déclenchement de décisions techniques
C 2*	Apparition de la perturbation Prévision de la perturbation par technique prédictive
H 2*	Fin de la perturbation
R 2*	CPU1, CPU2, HUM0, HUM1
LA2*	Selon la gravité, il y a action ou non Classification des actions selon les types de perturbation et exécution d'une marche dégradée pour décision

1.10 CONCLUSION

Ce premier chapitre constitue un travail d'analyse. Il nous permet d'appliquer des concepts connus sur un élément spécifique des systèmes de

production. Ainsi, nous établissons une approche méthodologique pour concevoir la gestion en temps réel d'une cellule flexible de production.

La fonction "PILOTE" est la trame "temps réel" autour de laquelle nous construisons un schéma informationnel, puis décisionnel lié à notre problème. Nous mettons en évidence la nécessité de définir cinq décisions "type", liées au niveau physique de fabrication. Entre autre, nous élargissons le champ classique d'investigation en proposant des moyens de traitement des conflits au niveau d'une ressource de transport.

Chapitre 2

SIMULATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION MANUFACTURIERS

2.1 INTRODUCTION

La conception des systèmes de production est à l'heure actuelle, un domaine en pleine expansion. L'industriel peut évaluer les performances de son outil de fabrication, avant investissement, ou en cours de production.

Les méthodes mathématiques (ex : programmation linéaire, théorie des files d'attente) permettent d'analyser les systèmes rapidement et de façon globale. En contre-partie, elles impliquent une modélisation qui simplifie notablement la réalité, et limite l'étude aux régimes stationnaires.

La simulation est une alternative qui autorise la représentation des détails fonctionnels d'une installation, et l'analyse du comportement global ou des régimes transitoires. Cependant, l'utilisateur doit réaliser de nombreux efforts pour formuler les aspects décisionnels liés à son système, puis les simuler correctement.

Après un rappel des concepts liés à la simulation des systèmes de production, nous présentons un logiciel spécifique, orienté vers les aspects décisionnels au sein d'une cellule flexible de production.

Problèmes liés à la conception des systèmes de production

Deux questions se posent à l'esprit d'un concepteur de systèmes de production :

- Comment fonctionnent, en commun, les moyens mis en oeuvre ; quelles sont les règles les mieux adaptées pour mettre en commun ces moyens ?

- Est-ce que le système est performant ; comment améliorer ses performances ?

La première question relève de l'analyse de l'adéquation des systèmes de production, tandis que la seconde concerne le domaine de l'évaluation des performances du système. Nous distinguons ces deux notions, que nous pouvons replacer dans l'espace des décisions présenté au 1^o chapitre.

* Adéquation des moyens de production

Après avoir établi, dans une première analyse, les performances prévues de chaque ressource prise individuellement, nous devons vérifier si la mise en commun des trois fonctions de production (Fabrication, Transport, Stockage) est cohérente ou non.

L'étude de cette adéquation vise la "fluidité" du système. Dans ce cas, les phénomènes de goulots d'étranglement seraient analysés et résolus a priori. C'est donc une analyse fonctionnelle de l'ensemble qui amène certaines questions :

"Le réseau de transport prévu n'engendre-t-il pas des points de saturation à certains instants ?"

"la conception d'un autre type de réseau ne serait-elle pas plus performante ?".

La démarche qui vérifie cette adéquation peut se représenter de la manière suivante :

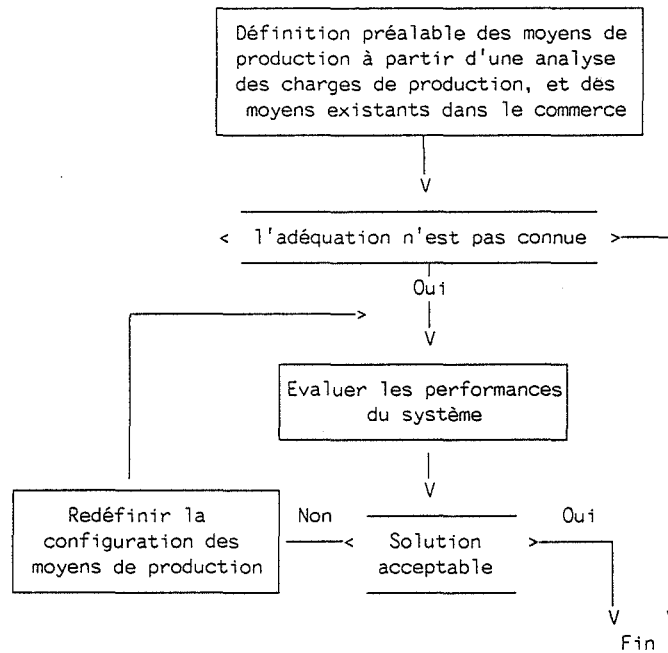


Figure 2.1: Cycles d'étude de l'adéquation des moyens de production

* Performances d'un système de production

En complément de l'analyse de l'adéquation des moyens de production, nous devons évaluer les performances du système ainsi constitué.

Si la première démarche ne peut être réalisée que lors de phases de conception ou de remise en cause d'une installation existante, l'analyse des performances est réalisée à tous les stades de la vie d'un moyen de production : A sa conception, dans le but établir une situation acceptable a priori, mais aussi en cours d'exploitation, pour prendre en compte l'évolution du système (ex : taux de panne plus élevés de certains organes, machines renouvelées et donc plus performantes) ou les modifications notoires du carnet de commandes.

La figure suivante présente la démarche employée pour étudier ces performances.

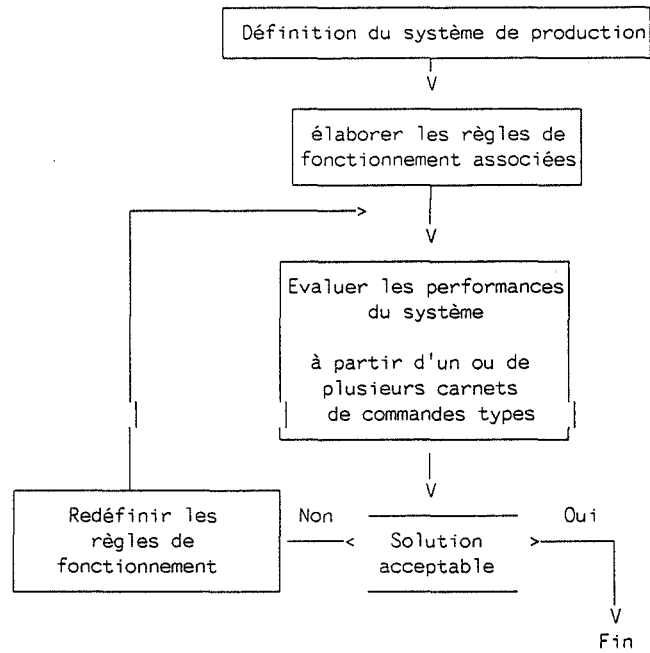


Figure 2.2: Cycles d'étude des performances des moyens de production

En fait, nous comprenons que l'adéquation des moyens et connexe à l'évaluation des performances du système. Ainsi, pour une installation donnée, il existe un certains nombre de *degrés de liberté*, qui constituent la flexibilité du système, et sur lesquels nous pouvons agir.

Si nous nous rapportons à notre espace de décision, le concepteur, en un premier lieu, se place suivant l'axe des décisions dites structurelles en définissant une solution technique. La flexibilité des décisions de son système est exploitée pour en évaluer les performances.

Citons un exemple : Une décision structurelle, au sein d'une cellule de fabrication, implique l'utilisation de machines sans stockage tampon et des stocks déportés. Pour évaluer l'adéquation de notre système, nous vérifions si les moyens de transport autorisent ce type de configuration, sans bloquer les machines trop longtemps avec une pièce terminée. Au préalable, celui-là doit être conçu pour ne pas être en déséquilibre, par rapport aux machines, au niveau des charges de travail. Nous nous plaçons selon l'axe des décisions structurelles.

Cette configuration peut être compatible, encore faut-il aborder les décisions de gestion. Ainsi, avant d'opter pour un autre moyen de

transport, ou d'installer des stockages intermédiaires, nous devons étudier s'il n'existe pas une méthode d'allocation de ressources qui répondrait à notre problème. Par exemple, le transport desservirait les machines par ordre de priorités intrinsèques, i.e. spécifiques à chaque machine. Nous nous déplaçons selon l'axe des décisions de gestion.

Ces études aboutissent à la définition d'un cahier des charges détaillé, qui décrit les spécifications du système de production avec sa partie commande.

Pour pouvoir orienter le concepteur correctement dans cet espace, les outils d'évaluation de performances sont nombreux. Nous les rappelons ici à titre indicatif. Le lecteur peut se reporter à (BEL -85) et (CAVA-87) pour de plus amples informations.

Les méthodes d'étude des comportements

Afin d'étudier le comportement des systèmes de production, le concepteur doit évaluer deux aspects. Le comportement en régime permanent détermine globalement si le système est bien équilibré, i.e. s'il contient des "serveurs" (ex : machines, transporteurs, outillages) en nombre suffisant permettant de réaliser chaque fonction de production. Le comportement en régime transitoire est orienté vers l'étude de la réponse du système face à un événement que nous qualifions d'aléatoire. Comment réagit le système face à une modification du carnet de commandes, ou lors d'une panne machine ?

Deux démarches existent pour l'étude des comportements des systèmes de production. Soit nous faisons appel aux méthodes analytiques, soit nous utilisons les outils de simulation.

La première nécessite une modélisation mathématique du problème. Celle-ci implique des hypothèses fortes sur le comportement du système, pour trouver des outils de résolution. En contre partie, nous obtenons des résultats proches de la situation optimum, et facilement interprétables par l'utilisateur. D'autre part, l'évaluation des performances avec des outils mathématiques est adaptée à l'étude des régimes permanents, mais pas à celle des régimes transitoires.

Les techniques de simulation nécessitent également une modélisation du problème, mais bien moins agrégée. En fait, celle-ci formalise mieux l'approche que peut avoir le concepteur de son système, et lui évite certaines erreurs classiques. Il peut développer diverses hypothèses et les tester. La simulation agrandit le champ d'investigation du problème. D'autre part, il est possible d'étudier les régimes transitoires.

Chacune de ces deux techniques trouve sa place dans l'analyse des systèmes. L'emploi de méthodes mathématiques aboutit à une analyse globale du problème. Cela est suffisant en phase de pré-étude. La simulation fournit, au concepteur, le moyen d'étudier les détails de fonctionnement de son système, et donc, l'adéquation de ces moyens de production.

Nous présentons l'utilisation des outils de simulation pour évaluer les performances des systèmes de production. Les applications temps réel nécessitant d'une part une représentation détaillée de tous les éléments constituant le système de production, et d'autre part une analyse des régimes transitoires, une approche analytique n'est pas adaptée à ce cas de figure. Comme nous l'avons cité ci-dessus, la lecture de (BEL -85) et (CAVA-87) fournit de plus amples renseignements.

2.2 MODELISATION

L'observation des systèmes discrets aboutit à l'établissement de modèles. Nous avons vu que les techniques d'évaluation des performances impliquent une phase de modélisation. Nous obtenons, donc deux classes de modèles :

- Les modèles mathématiques
- Les modèles préalables à la simulation

* Modélisation mathématique

L'établissement de modèles mathématiques est l'aboutissement des travaux réalisés dans le domaine de l'analyse statistique des processus discrets (ex : modèles stochastiques), ou de la théorie des graphes (ex : algèbre des dioïdes, programmation dynamique, réseaux P.E.R.T.).

* Modélisation stochastique

Les modèles stochastiques d'ateliers ont débouché sur la théorie des files d'attente. Ils consistent à représenter chaque fonction (fabrication & transport) par des guichets, avec un ou plusieurs serveurs. Le modèle s'exprime par une probabilité d'avoir n_i clients au guichet i , la loi de service doit être de type exponentiel, et le passage dans la file d'attente de type Premier Arrivé, Premier Servi.

L'évaluation des performances du système consiste à résoudre un système d'équations récurrentes ou différentielles, selon que la représentation du temps est discrétisée ou récurrente. La résolution de cette équation détermine la probabilité de retrouver le système dans un état donné.

Un cas particulier des files d'attente, les chaînes de MARKOV, néglige les temps résiduels de services. Celles-ci fondèrent l'analyse des lignes automatisées de transfert. Mais la théorie devient complexe lors de l'étude détaillée d'ateliers flexibles.

* La théorie des graphes

Une approche moins globale des systèmes discrets se sert des outils disponibles selon la théorie des graphes (MULL-72).

La représentation par graphes potentiels-tâches (ROY-70) a constitué les fondements de l'analyse des performances de cas particuliers.

Dans le cas de graphes ne comportant pas de cycles et dont les tâches sont en nombre fini, nous obtenons les réseaux P.E.R.T.. Ils permettent d'étudier la faisabilité d'un projet mettant en oeuvre des tâches réalisées successivement ou parallèlement. L'analyse de ces réseaux est fondée sur la recherche du chemin critique.

Le cas de graphes orientés avec circuits a été étudié. C'est l'algèbre des dioïdes (COHE-83). Cette algèbre est utilisée dans le cas de processus répétitifs.

* Modélisation préalable à la simulation

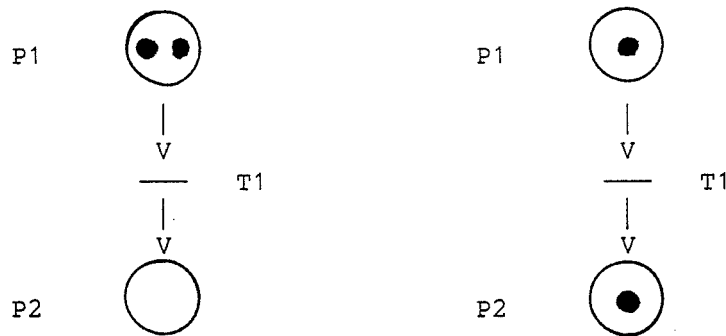
A l'opposé, la simulation emploie des modèles extraits de l'analyse fonctionnelle des processus discrets. Une file d'attente n'est plus une probabilité d'être dans cette file avec une probabilité d'être servi, mais c'est une succession de places qui parviennent à un serveur avec un temps de service non connu a priori. L'approche est totalement différente. Mathématiquement, elle correspond à la théorie des réseaux de PETRI (RdP).

Modélisation graphique par réseaux de PETRI

L'approche RdP devrait se placer avec les méthodes analytiques, puisqu'elle découle de l'application des graphes aux processus discrets. Cependant, nous préférons la placer dans les modélisations préalables à la simulation, car la démarche employée par les RdP vise la mise en oeuvre de méthodes de simulation pour l'évaluation des performances d'un système discret.

Rappelons, brièvement, le principe de ces réseaux. La dynamique des systèmes discrets est représentable sous la forme de places - états possibles du système - et de transitions. Le lien logique entre place et transition est créé par des arcs orientés et valués. Les jetons symbolisent les ressources du système. La présence d'un jeton dans une place, indique l'état de la ressource associée. A un instant donné, l'ensemble des jetons dans le réseau, constitue le marquage.

La logique de changement d'états du système est représentée par les transitions. Le passage d'un jeton, d'une place à une autre, est conditionné par une transition. L'évolution du réseau se fait par tirage des transitions, qui fait passer les jetons des places amont aux places aval de chacune d'elles. Le poids de l'arc indique le nombre de jetons mis en oeuvre ("consommés" ou "produits") dans la transition.



Un jeton passe de P1 à P2 par tirage de la transition T1

Figure 2.3: Principe général des réseaux de PETRI

Dans sa forme de base, les RdP sont adaptés à des cas simples de systèmes discrets. Mais on constate une croissance difficilement gérable du nombre de places en fonction du système à représenter. D'autre part, bien qu'adaptés à l'étude de la synchronisation de processus, ils ne prennent pas en compte la notion de temps.

Pour pallier à ces inconvénients, deux théories furent développées. Ce sont la temporisation des réseaux (RdPT) et la coloration (RdPcT) (JENS-81) (MART-87).

La temporisation modélise l'aspect temporel dominant des systèmes de production. Elle est associée à une place, correspondant, par exemple, à l'usinage d'un produit. La durée de transit du jeton sur cette place est induite par cette temporisation. Le jeton devient disponible lorsque la temporisation est écoulée. Notons qu'une représentation duale associe la temporisation aux transitions et non plus aux places.

La coloration, quant à elle, diminue le développement des réseaux. Par exemple, elle facilite la représentation de produits différents qui parcourent simultanément le réseau.

La modélisation par RdPcT possède de multiples avantages. Utilisation d'un langage commun à la spécification, l'étude et la commande des systèmes discrets, validation mathématique. Cependant, elle nécessite la mise en oeuvre de moyens conviviaux pour toucher un plus grand nombre d'utilisateurs. Nous verrons, ci-dessous, quelques références de logiciels qui vont dans ce sens.

Approche ICAM

Une approche moins théorique, mais plus empirique, fut réalisée par les Etats Unis, dans le Cadre de l'ICAM program (Integrated Computer Aided Manufacturing) au cours des années 70 (ICAM-80). Elle consistait à étudier les systèmes de production aux trois niveaux (fonctionnel, informatif et dynamique), pour aboutir aux modèles IDEF (Icam DEFINition).

IDEF0 : Modèle fonctionnel des systèmes de production. C'est une représentation structurée des fonctions d'un système de production ou de son environnement. Ce modèle illustre aussi les informations et les objets qui transitent entre ces fonctions.

IDEF0 est plus connu sous sa forme initiale, c'est à dire S.A.D.T. (Structured Analysis and Design Technique).

IDEF1 : Modèle d'informations. Il représente la structure des informations nécessaires à la réalisation de la fonction production.

IDEF2 : Modèle dynamique. Il représente le comportement dans le temps des fonctions, informations et ressources d'un système de production et de son environnement.

En premier lieu, IDEF concerne l'analyse des systèmes de production et de leur environnement. Ainsi, une première analyse des systèmes peut exploiter la méthode SADT (IGL-87). Par la suite, la modélisation IDEF amène l'utilisation de logiciels de simulation pour étudier le comportement dynamique (IDEF2) des systèmes.

La modélisation IDEF, par rapport aux RdPcT, a l'avantage d'utiliser des éléments agrégés, mais perd de sa qualité lorsque nous abordons l'aspect validation mathématique propre aux RdPcT.

Par exemple, selon la théorie des RdPcT, une file d'attente se décrit comme N emplacements avec transition de sortie de chaque emplacement. Cette représentation est validée mathématiquement, mais le processus de choix dans cette file d'attente ne peut être représenté. Tout au plus, l'emploi de coloration permet de décrire le principe de priorité statique, c'est à

dire figée. En effet, l'application des règles de décision est dite combinatoire, et de ce fait, ne correspond plus au formalisme des RdPcT.

Selon un modèle IDEF2 nous représentons la même file d'attente avec un seul élément. Cet élément comprend, non seulement, le processus physique d'attente d'une capacité de N emplacements, mais aussi le processus de choix de cette pièce dans cette file.

Modélisation orientée objets

Pour représenter un système de façon quasi-naturelle, la programmation orientée objet (POO) utilise les concepts de propriétés de chaque objet, et de règles d'évolution propres à chaque objet. La notion d'héritage détermine des classes d'objets qui possèdent les mêmes propriétés et les mêmes règles d'évolution. Par instanciation, i.e. par recopie d'un objet donc transmission de l'héritage, un nouvel objet est créé. Il contient des propriétés modifiées ou complémentaires, ainsi que des règles que l'utilisateur peut redéfinir.

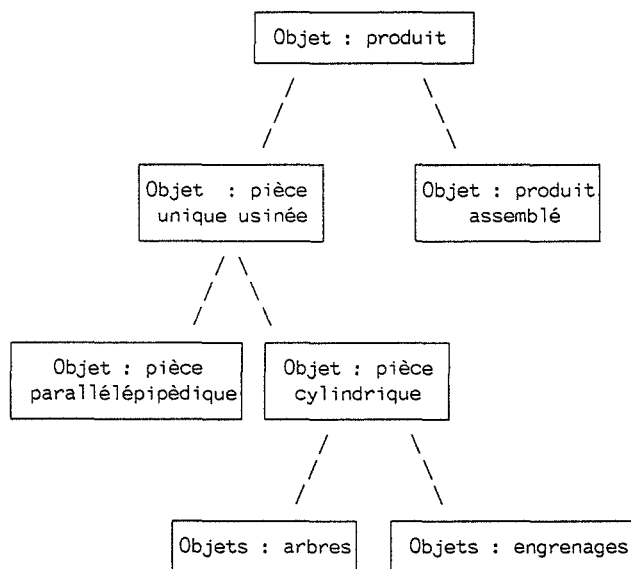


Figure 2.4: Modélisation orientée objet

La figure précédente présente un cas d'application de la notion "objets" (HOLL-87). Dans le cas d'une fabrication d'engrenages, nous savons que c'est un objet de type "produit". Il hérite donc des propriétés et des règles des produits ; présence éphémère dans le système de production,

règle de commercialisation Mais il hérite aussi de la classe des pièces usinées ; transformation de matières brutes en produit fini lors de passage sur des moyens d'usinage (ex : tour, fraise, centre d'usinage). Le mode d'obtention du produit s'affine lorsque nous descendons la hiérarchie.

Notre objet "engrenage" possède ses propriétés et ses règles d'élaboration. Cependant, si nous voulons réaliser cette pièce, nous devons prospecter les ressources nécessaires à la réalisation de ces produits. La notion de messages émis entre objets permet à la machine d'indiquer au produit que l'usinage peut débuter.

La représentation du temps devient différente. Chaque objet contient son horloge, qui lui permet de déclencher ou non les tâches lui afférentes. Par ailleurs, un système de moniteur d'objets coordonne les activités de chacun (HOLL-87).

* Tableau récapitulatif

En résumé, nous pouvons établir un tableau de correspondances entre la logique de changement d'état du système étudié, et le type de modèle employé (BEL-85).

Table 2.1: Correspondance logique de changement d'état / modèle d'évaluation

Logique de changement d'état	Modèle associé
Probabilité de transition entre états et règles de priorité aux stations	Stochastiques de réseaux de de files d'attente
Séquences d'activités pré-définies pour tous les objets	Graphes potentiels-tâches, algèbre des dioïdes.
Séquences d'activités partiellement définies pour certains objets	Réseaux de PETRI temporisés Graphes disjonctifs
Prédicats	Réseaux de PETRI interprétés et temporisés (GRAFCET)
Règles de priorité ou algorithmes plus ou moins complexes avec ou sans feedback	Modèles spécifiques pour la simulation par événements discrets

2.3 "ETAT DE L'ART" EN SIMULATION

2.3.1 Méthodes analytiques

Les modèles stochastiques de production ont été mis en oeuvre dans certains logiciels d'analyse des performances. Nous pouvons citer le logiciel QNAP2 (SAGU-84), qui, entre autre, comprend une gamme complète d'outils d'analyse des performances, allant du solveur mathématique à l'approche simulation.

Ces outils sont classés selon deux critères :

- type de serveur : mono ou multi-serveurs
- nombre de clients différents autorisés : mono ou multi-classes

Dans la limite des modèles autorisés, ces outils sont très utiles en pré-étude.

2.3.2 Méthodes formelles : les réseaux de PETRI

La représentation par RdPcT aboutit à une classe de simulateurs, associés à des moyens de validation mathématique. Ces outils sont intéressants, car ils apportent les moyens de correction des erreurs de conception des systèmes. En contre partie, la modélisation devient complexe et peu ouverte à de non-initiés.

Les travaux, récents, réalisés dans le domaine des RdPcT, se sont efforcés d'établir des primitives représentant des fonctions de production déterminées. La mise en oeuvre de ces primitives fait l'objet de logiciels dédiés, couches complémentaires entre les simulateurs généraux de RdPcT et l'utilisateur.

Dans ce domaine, nous citerons les logiciels SEDRIC (TECH-88) et ARCANTIEL (MART-87).

2.3.3 Langages de simulation généraux

Les approches générales des systèmes discrets, telles que IDEF, débouchent sur une classe de langages informatiques. Ce sont les langages de simulation.

Ces langages se répartissent en trois classes, selon le type de représentation des mécanismes de changement d'états. Ce sont les approches par événement, par activité et par processus.

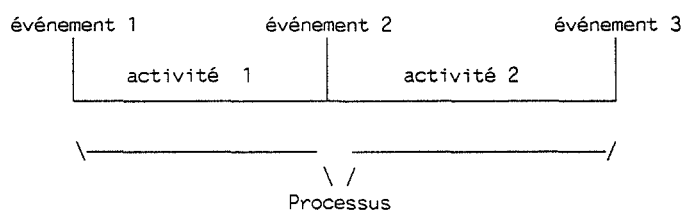


Figure 2.5: Relation Evènement/Activité/Processus

La figure ci-dessus indique la correspondance entre ces trois notions. Illustrons ceci par l'exemple du passage d'une pièce sur une machine pour usinage.

Dans le cas de l'approche par événements, l'utilisateur décrit la réquisition de la ressource machine, la logique de l'usinage..., c'est à dire la logique de changement d'état de chaque variable liée à cet usinage. Le temps est simulé par accès immédiat à la date de fin d'usinage. Si d'autres événements venaient à se produire en cours d'usinage, le temps accède, au préalable, à la date d'exécution de ces événements.

L'approche par activités diffère par le fait que l'utilisateur va déclencher une action, et que, par scrutation du temps, il attend la fin de cette activité. Dans le cas de l'usinage d'une pièce, nous décrivons le début de l'activité par l'engagement d'une pièce sur une ressource machine pendant un temps T. Le temps est simulé par une fonction incrémentale jusqu'à la fin de l'usinage.

L'approche par processus est une forme agrégée de celle par événements. Elle décrit le processus à l'aide de macro-instructions, qui possèdent leur logique de changement d'état. Dans le cas de notre usinage, trois instructions suffisent :

- 1° Demande de la ressource machine
- 2° Cycle d'usinage
- 3° Libération de la ressource pour la pièce suivante.

Les approches par événements et par processus sont semblables. L'unique caractéristique qui les distingue est le niveau d'agrégation. De plus, par abus de langage, les logiciels sont intitulés "Simulation par événements discrets".

L'approche par activités est abandonnée dans le domaine des systèmes discrets, son mode de représentation du temps impliquant des durées de simulation inacceptables.

Ces langages comportent des primitives de modélisation extraites soit d'IDEF (SLAM)(SIMAN), soit d'approches similaires (SPRIN-87) (MEIJ-85). L'utilisateur doit identifier ces primitives à travers son système de production. De cette identification résulte un schéma composé de blocs fonctionnels. A partir de ce schéma l'utilisateur écrit un programme lui permettant d'évaluer les performances de son modèle.

En dehors de la phase d'adaptation au langage, cette méthode de simulation est souple de mise en oeuvre et relativement adaptée à une majorité de cas industriels. Cependant, l'ensemble des blocs fonctionnels ne suffit pas, dans certains cas, à représenter toutes les particularités du système à simuler.

Reste que l'ouverture de ces logiciels vers un langage informatique classique donne l'accès à la rédaction, sous forme procédurale, de spécificités complémentaires.

2.3.4 Simulation dédiée

Une approche plus industrielle consiste à développer des logiciels spécifiques, pour une classe de problèmes de production. Ces logiciels comportent des interfaces, plus ou moins évolués, permettant à l'utilisateur de s'abstenir des connaissances informatiques. En contrepartie, leurs champs d'application sont restreints.

Les bases de ces logiciels dédiés sont diverses. Elles sont établies à partir de l'expérience professionnelle que possède l'industriel (SIMULFLEX), ou sont issus d'un langage général (SIMPROD conçu à partir de QNAP2).

2.3.5 Utilisation de l'intelligence artificielle

Une nouvelle voie de représentation des systèmes discrets consiste à employer les outils disponibles dans le domaine de l'Intelligence Artificielle (I.A.), et plus particulièrement la programmation orientée objet (POO). Cette approche a pour intérêt son aspect "naturel", l'utilisateur spécifiant les caractéristiques de son système dans un langage proche du langage naturel (BEZI-84).

Dans un contexte I.A., le concepteur de systèmes de production modifie son univers de travail. La notion d'objets spécifiques, héritage d'objets généraux, lui permet de personnaliser un contexte de simulation sur la base d'un modèle général des systèmes de production.

D'autre part, la mise en oeuvre de base de règles l'aide à spécifier les lois de gestion, difficilement représentables par les méthodes classiques (PIER-87).

Finalement, l'environnement de travail de l'I.A. assiste le concepteur à l'élaboration d'une solution acceptable vis à vis des performances souhaitées.

2.3.6 Résumé

La figure suivante résume les divers produits existants, classés selon leur type.

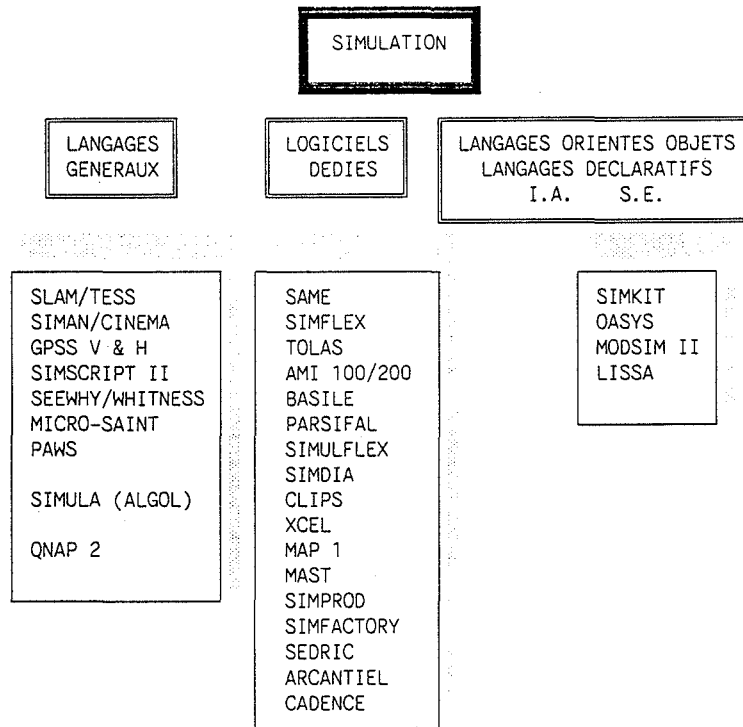


Figure 2.6: L'offre en simulation

2.4 SIMULATION ET DECISION

Notre phase d'analyse a mis en évidence l'importance du niveau décisionnel dans les processus de production. Nous recherchons donc un outil qui traite chaque composante.

Approche stochastique : Les études portant sur des modèles stochastiques ne permettent pas de représenter la décision. En effet, les modèles conçus sont probabilistes et visent une étude de régimes stationnaires uniquement.

Dans ces applications, les décisions sont liées aux phases d'analyses préalables à la modélisation.

RdPcT : La représentation des décisions n'est pas prise en compte dans cette approche. Ce lacune est mise en évidence lorsqu'un choix doit être réalisé entre plusieurs transitions pour extraire un seul jeton, ou entre plusieurs jetons pouvant franchir la même transition.

Les travaux de (BESO-90) introduisent la notion de réseaux à décision pour lever ces conflits.

ICAM : L'approche IDEF rationalise l'étude des systèmes de production. Elle permet de représenter les niveaux structure et information. Cependant les aspects décisionnels ne sont traités que partiellement. Certains noeuds IDEF2 (Selector, Queue...) contiennent des points d'entrée aux fonctions décisionnelles, que l'utilisateur définit par ailleurs.

(PIER-87) utilise cette méthodologie pour coupler le langage SLAM avec un système expert GOSSEYN, dans le but de traiter la simulation d'un processus de fonderie.

POO : L'approche Programmation Orientée Objet constitue un bon élément de représentation d'un univers donné. Mais aucun mécanisme nouveau n'est apporté pour traiter correctement les décisions.

Il semble donc intéressant de constituer un outil intégré, qui associe simulation et décision temps réel. L'intérêt d'un tel produit réside dans la mise en oeuvre d'un moyen unique pour étudier le dimensionnement et la gestion d'une cellule de production.

2.5 L'APPLICATION SIMULFLEX

SIMULFLEX est une application, d'origine industrielle, orientée vers la simulation des cellules flexibles de production. Elle permet de dimensionner une cellule, puis d'évaluer les effets d'une ou plusieurs règles de gestion sur les flux de produits.

Nous présentons, ici, les éléments moteurs de ce logiciel. Le lecteur se reportera en annexe pour une description technique de l'application.

2.5.1 Principe général

A une entité, représentée par le logiciel de simulation, nous lui associons trois vecteurs de données :

- Vecteur de configuration

- Vecteur d'état instantané
- Vecteur d'observation

Chaque vecteur contient une composante temporelle et une autre d'état.

La simulation est intégrée dans un ensemble de modules de saisie et de traitements d'informations. La figure suivante présente l'exploitation de ces vecteurs de données.

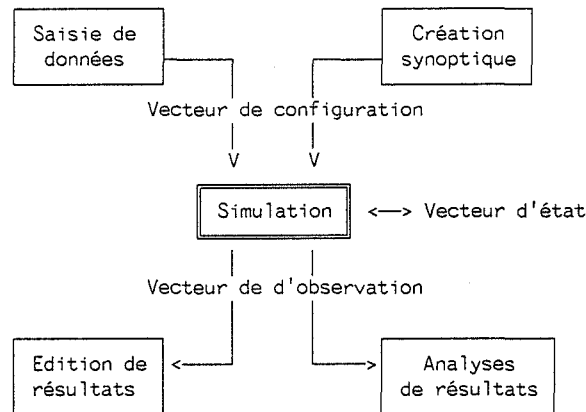


Figure 2.7: Contexte de simulation

Nous définissons les trois vecteurs comme suit :

Vecteur de configuration

Définit les éléments de fonctionnement d'un moyen de production ou d'un produit à fabriquer. Par comparaison aux RdPCT, c'est le réseau lui-même.

Ex : Pour une machine, son vecteur de configuration indique, entre autre, si elle est utilisable en période de veille, quelles sont ses lois de mise en panne et de réparation, quelles sont les capacités de stockage des zones tampons associées, etc.

Vecteur d'état instantané

Ce vecteur est utilisé en simulation. Il regroupe l'état du moyen ou du produit à un instant donné. C'est l'équivalent du marquage des RdPCT. A chaque instant, ce vecteur est susceptible de changer.

Ex : Pour une machine, son vecteur d'état instantané indique, entre autre, la pièce en cours de transformation, le temps restant pour terminer cette transformation, le nombre de pièces présentes dans les zones tampons associées, etc.

Vecteur d'observation

Regroupe les informations d'observations temporelles et d'état , en vue d'établir les résultats statistiques sur l'utilisation des moyens de production.

Ex : Pour une machine, son vecteur d'observation indique les durées d'utilisation, de panne, de blocage observées, l'occupation moyenne et maximum de la file d'attente, etc.

2.5.2 Schéma conceptuel

Nous rappelons les schémas conceptuels associés aux principales entités qui composent notre modèle de système de production. A cet effet, nous utilisons la représentation de type "Entité-relation" qui illustre les liens entre chaque objet (GALA-84).

Schéma produit

Une pièce est donc d'un type donné, et lancée en fabrication selon un programme de production composé de séries de pièces. Chacune de ces séries se voit attribuer une date de lancement théorique, un délai de livraison et une priorité commerciale qualifiée d'externe.

A un type de pièce, nous associons aussi une gamme de fabrication qui décrit la succession des opérations à réaliser pour obtenir ce type.

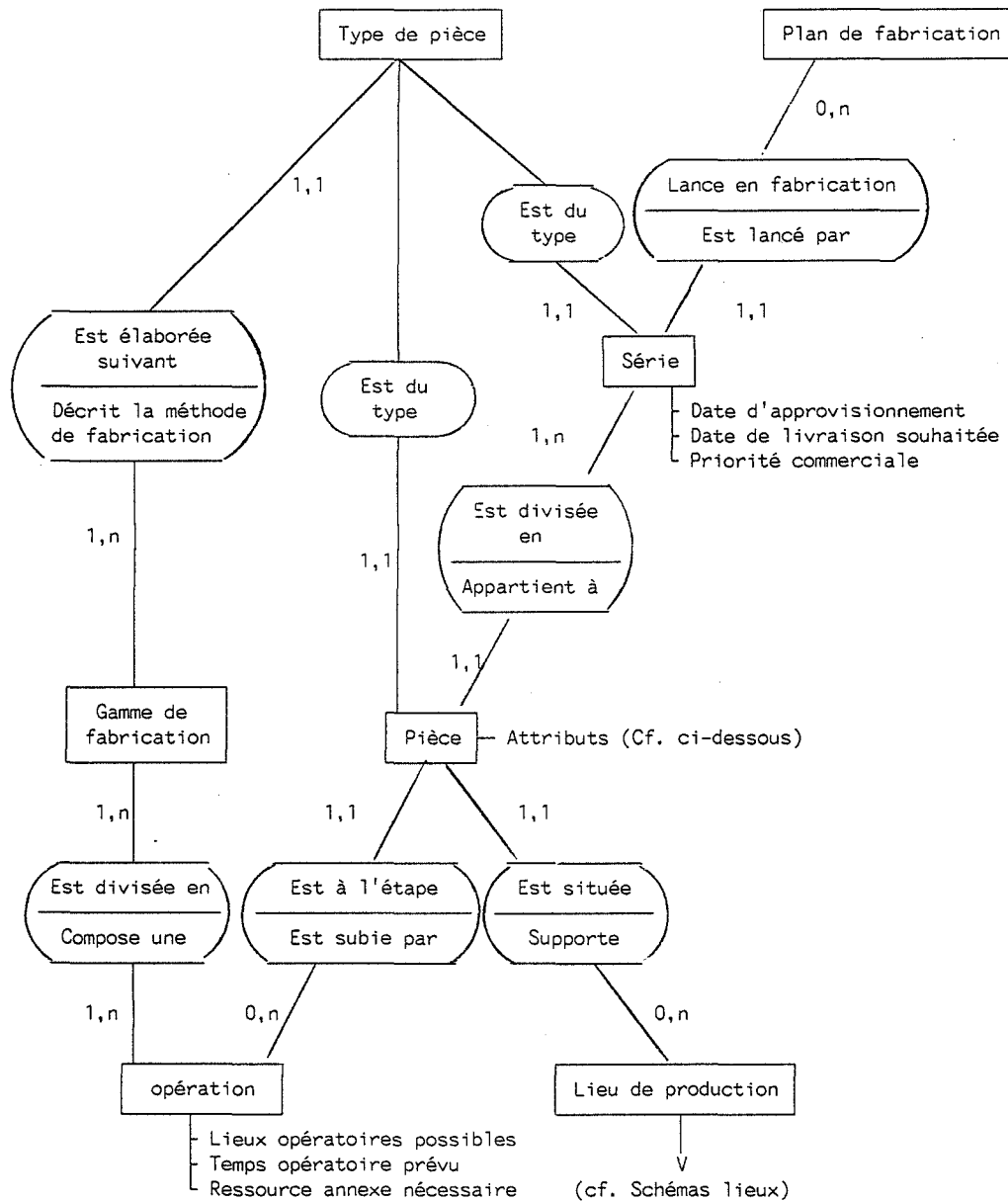


Figure 2.8: Schéma produit

Une pièce en cours de fabrication, est située sur un lieu de production. Ce lieu est soit un poste de travail, soit un moyen de stockage ou un moyen de transport. Elle subit une opération qui indique son état d'avancement dans la gamme.

Pour représenter informatiquement l'évolution du planning de production, nous avons donc créé une liste chaînée de pièces engagées sur la cellule. D'autre part, pour une pièce donnée, les attributs sont les suivants :

Pièce	Vecteur associé
— N° d'introduction (Identifiant clef)	Configuration
— Type de pièce	"
— N° de série	"
— N° dans la série	"
— Date de livraison souhaitée	"
— Priorité externe	"
— Opération en cours ou subie	Etat
— Marge brute ou pondérée	"
— Priorité interne	"
— Date d'introduction effective	Observation
— Date de sortie effective	"

La dynamique du passage d'une pièce sur la cellule est exécutée à partir de la gamme opératoire et des disponibilités des moyens.

Schéma poste de travail

Pour les machines, ou postes de travail, nous associons un schéma, de type lieu, qui lie une ressource de production aux produits et ressources annexes.

Ainsi, une machine opère sur un produit que nous pointons dans la liste des produits en cours de fabrication. A ce produit, et selon la gamme de production, nous associons une ressource annexe, de type montage (qui n'est pas obligatoire).

A cette machine nous associons également les liens avec les moyens de stockage (ex : stocks tampons entrée/sortie) aux abords de celle-ci.

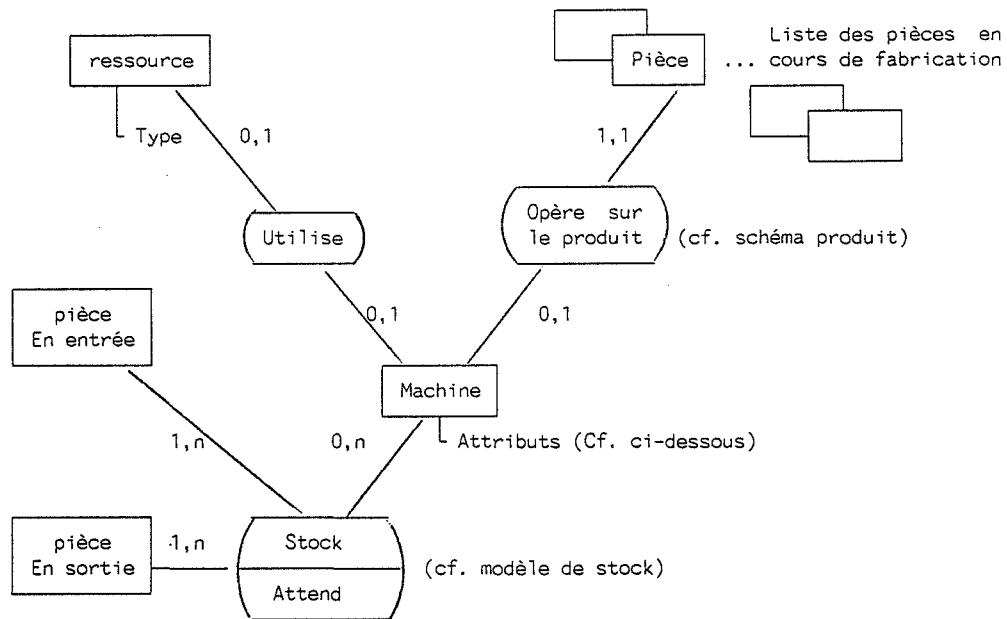


Figure 2.9: schéma machine

La liste des attributs associés à un poste de travail, nous permet de traiter les divers aspects de disponibilité, son mode de pilotage, et la gestion des moyens de stockage associés ...

Poste de travail	Vecteur associé
Position du poste	Configuration
Disponibilité horaire	"
Dimensions tampons entrée et sortie	"
Lois de gestion en entrée et en sortie	"
Loi de mise en panne (MTBF)	"
Loi de réparation (MTTR)	"
Mode de réglage	"
Temps résiduel de l'opération en cours	Etat
Etat de disponibilité actuel (en panne, disponible, arrêter, en réglage)	"
Délai résiduel avant panne ou fin de réparation	"
Longueurs actuelles tampons entrée et sortie	"
Temps de panne, d'arrêt ou de blocage effectif	Observation
Temps d'utilisation et de réglage effectifs	"
Occupation maximum des tampons entrée et sortie	"

La dynamique de fonctionnement d'un poste de travail est décrite à l'aide d'une suite d'étapes :

* Le poste subit successivement les étapes :

- (- Poste en attente,
- Chargement,
- Réglage,
- Usinage,
- Attente d'évacuation,
- Déchargement,
- Poste en attente)

- * Les actions de chargement et de déchargement nécessitent l'emploi de la ressource de transport.
- * Le réglage est effectif suite à un changement du type de produit.
- * A chaque étape, le poste est susceptible de subir une panne.

Schéma stockage

Nous avons défini divers moyens de stockage (cf. ANNEXE C), aux pieds des machines (ex : stocks tampons entrée/sortie), communs à plusieurs machines (ex : postes de stockage) ou remplissant certaines fonctions spécifiques (ex : zones de stockage, stockage de pièces démontées).

Le schéma conceptuel est en quelque sorte, identique pour tous les cas. Nous le divisons en deux : Un lieu élémentaire de stockage, l'emplacement, et l'ensemble de plusieurs emplacements (ex : zone de stockage, tampons entrée/sortie).

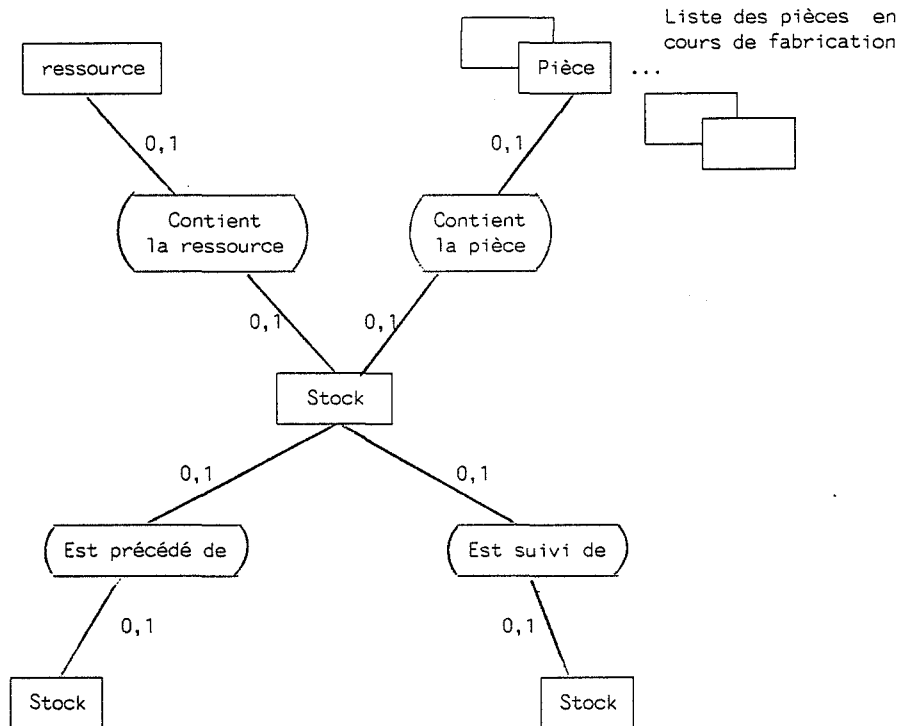


Figure 2.10: Schéma emplacement de stockage

Les attributs associés à un emplacement de stockage dépendent de la nature de celui-ci.

Poste de stockage

- Position du poste
- Postes de travail affectés
- Durée d'utilisation

Vecteur associé

Configuration
"
Observation

Les postes de stockage sont disponibles pour stationner une pièce, ou une palette vide, dans l'attente d'une nouvelle opération.

En dehors des postes de stockage et des moyens tampons entrée/sortie, les zones de stockage constituent des ressources assimilables à l'exécution d'une action extérieure sur les produits réalisés dans la cellule (ex : contrôle non destructif, perte de contraintes d'usinage, traitement thermique).

Ainsi, pour un emplacement d'une zone, nous associons une durée de passage, à l'échéance de laquelle le produit est ré-inséré dans la cellule.

Emplacement zone de stockage

- Durée de stockage résiduelle

Vecteur associé

Etat

Zone de stockage

Vecteur associé

- Capacité disponible
- Règle de gestion
- Capacité utilisée
- Liste des pièces en cours de stockage
- Liste des pièces disponibles
- Capacité maximum utilisée

Configuration
"
Etat
"
Observation

Schéma transport

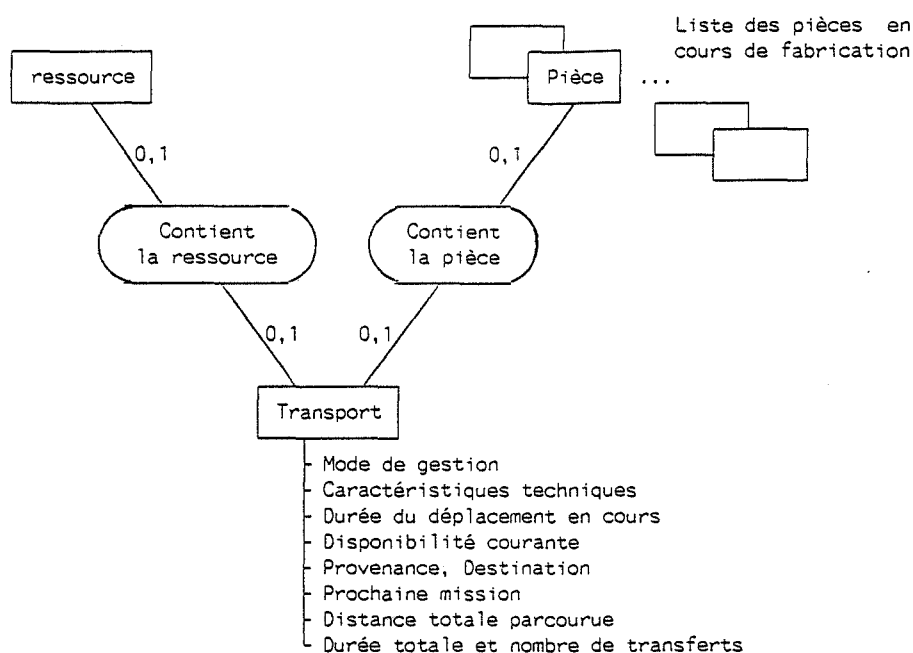


Figure 2.11: Schéma d'un moyen de transport

La dynamique de fonctionnement du transport est régit, soit par une allocation de mission selon les décisions D04, soit par un trajet pré-défini par le produit transporté.

* Le transport réalise successivement des séquences

(- Prise,
- Déplacement,
- Dépose,
- Déplacement,)

- * S'il est muni de deux préhenseurs, alors il est apte à réaliser des séquences d'échange avec un lieu.
- * Si le transport attend devant une ressource indisponible, alors une marche dégradée conduit, soit à replacer le produit manutentionné sur un moyen de stockage, soit à allouer une nouvelle mission au transport vide.

2.5.3 Algorithmes de principe

L'algorithme principal présente l'inter-dépendance entre l'évolution du temps simulé selon un modèle par événement, et le déclenchement de ceux-ci. La mise à jour de la partie temporelle des vecteurs d'observation est réalisée à ce niveau.

De cette façon, une action extérieure, telle que la mise en panne interactive de machine, peut être exercée sur le simulateur sans altérer les résultats. Tous les phénomènes de changement d'état sont traités selon le même schéma.

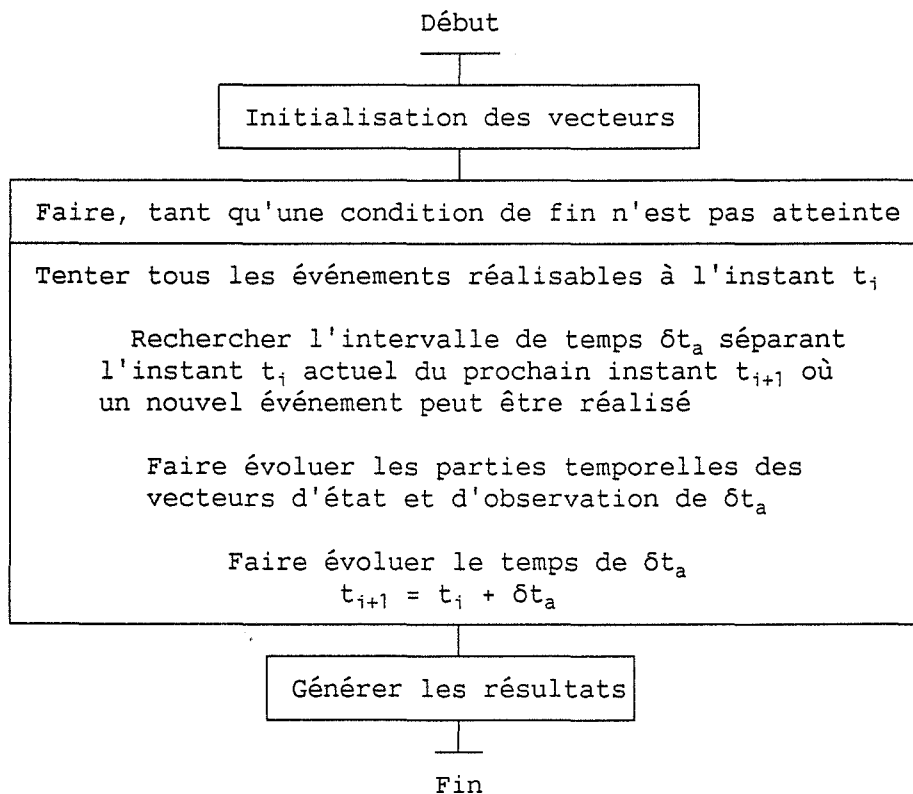
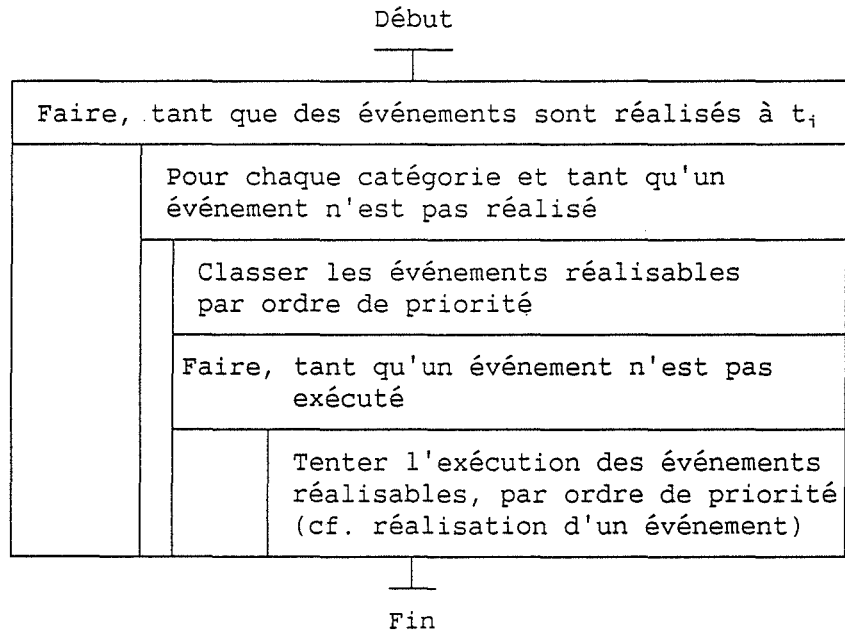


Figure 2.12: Algorithme principal de simulation

Les conditions de fin normale de simulation sont, soit que la production demandée est réalisée, soit que la situation est dite inextricable, c'est à dire ne pouvant évoluer, soit, finalement, qu'un arrêt ait été décidé par l'utilisateur.

La partie changement d'état possède plusieurs moyens de contrôle. Ceux-ci contribuent à la mise en oeuvre des processus de gestion de façon intégrée. Ces moyens définissent des catégories d'événements. Vis-à-vis des RdPCT, le problème se situe à deux niveaux, ordre de tirage des transitions non conflictuelles, puis, choix entre plusieurs transitions conflictuelles.

Tentative de réalisation des événements



Tentative de réalisation d'un événement

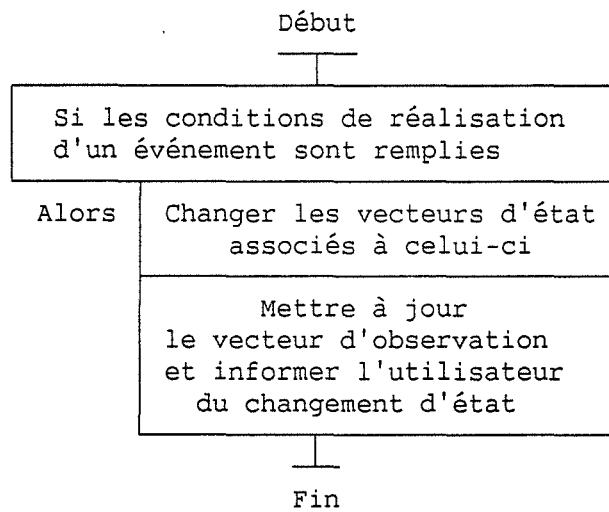


Figure 2.13: Génération d'événements à l'instant t_i

2.5.4 Architecture logicielle

La fonction "simulation" de SIMULFLEX est réalisée à partir 11 modules principaux.

* Simul : Programme principal.

Il déclenche les procédures d'initialisation ou de sauvegarde des données.

Il contient l'algorithme principal décrit ci-dessus, et traite ainsi, l'exécution de l'échéancier, la collecte de statistiques, et l'appel aux procédures de déclenchement des événements.

- * Simini, Simfin : Modules de gestion de fichiers, et d'établissement des résultats.
- * Simtran, Simnav : Traitent les tentatives de réalisation d'un événement en vérifiant toutes les conditions de validité.
- * Simclas, Simopnav : Ces deux modules réalisent le traitement des décisions temps réel, soit sur les moyens de stockage, soit sur le transport.
- * Simalea : génère les distributions de nombres aléatoires.
- * Simecran, Simutil, Simgraph : Ces trois derniers modules gèrent l'affichage du suivi de simulation dans les divers modes (une dizaine de modes sont disponibles). D'autre part, ils permettent l'interaction avec l'utilisateur, entre autre, pour le déclenchement des pannes.

Deux modules complémentaires ont été élaborés pour exécuter une succession de simulation (Simbatch), et pour exploiter le logiciel sous forme de bibliothèque accessible par une application *Utilisateur* (Simuser). Ce dernier donne l'accès aux points d'entrée suivants :

- * Définition d'une date utilisateur de déclenchement d'un événement,
- * Événement utilisateur déclenché à la date ci-dessus définie,
- * Redéfinition de règles de priorité,
- * Accès à la trace de la simulation.

Cette dernière fonction vise à définir un environnement de travail pour associer le logiciel à une fonction "PILOTE" de cellule de production.

2.5.5 Traitement des décisions

* Modèles de règles de priorité

Nous définissons trois modèles de règles de priorité selon le mode de calcul associé :

- * Règles statiques ; La priorité est calculée, mais non ré-évaluée. Puis, l'entité concernée est classée selon cette priorité, au sein la ressource (ex : tampon entrée). Entre autre, la règle "Spt" fonctionne selon ce principe.
- * Règles dynamiques 1 : Pour établir un classement de la nouvelle entité à classer, la priorité des autres entités doit être ré-évaluée. Cependant, aucun classement complet de la "file d'attente" considérée, ne doit être effectué. C'est le cas de la règle "Slack"
- * Règles dynamiques 2 : Pour établir un classement de la nouvelle entité à classer, la priorité des autres entités doit être ré-évaluée, et un classement complet de la "file d'attente" considérée, doit être effectué. C'est le cas d'un changement de règle, ou de l'application d'une troncature entre deux règles.

* Principe d'application d'une règle

Une règle génère un classement des entités ou des ressources. Ce classement est mémorisé de façons différentes selon les cas.

Ou bien la structure de données est adaptée au problème, c'est le cas des listes chaînées employées pour les tampons entrée/sortie ou les zones de stockage. Ou bien, nous utilisons une table intermédiaire de classement qui pointe sur chaque élément classé. Cette table est reconstituée à chaque occurrence de la décision concernée.

* Principe de gestion d'un moyen de stockage

A une pièce circulant dans le système de production, nous affectons une priorité interne, dépendant du lieu où elle se situe. En règle générale, nous considérons qu'un moyen de stockage, de dimension donnée, est représenté par une liste chaînée d'emplacements (cf. Schéma conceptuel d'un moyen de stockage). Le premier élément de cette liste est ainsi le premier à sortir.

Lors de l'arrivée d'une nouvelle pièce, si le mode de gestion est FIFO, alors, elle est placée en fin de liste. De même, si la règle est LIFO, elle est introduite en début de liste.

Dans le cas général, nous calculons la priorité interne de la pièce à insérer. Puis, nous recherchons sa position, en fonction de cette priorité, dans la file d'attente.

Notons que l'exploitation d'une structure chaînée simplifie notablement cette gestion. Un modèle par tableaux d'emplacements requiert une table annexe pour gérer l'ordre des éléments du tableau.

* Principe de gestion du transport

En fonction du mode de gestion, nous établissons une table des sollicitations valable à l'instant $t_i + \delta t_a$ (δt_a : intervalle d'anticipation) et nous sélectionnons la mission la plus prioritaire pour l'allouer au moyen de transport devenu disponible.

Les algorithmes présentés au 1^o chapitre sont effectifs pour réaliser les choix entre plusieurs sollicitations.

2.6 CONCLUSION

Dans ce second chapitre nous abordons les différentes possibilités d'évaluation des performances d'une cellule de production, et présentons une application dédiée au problème de la cellule flexible de production.

Après avoir mis en évidence le manque existant, dans le domaine de la simulation, pour modéliser les décisions, nous exposons les spécificités du produit SIMULFLEX.

Les mécanismes de simulation, puis de traitement des règles de décisions temps réel, sont décrits. Les schémas conceptuels, puis le traitement des décisions par des techniques classiques d'évaluation de priorités rejoignent l'analyse réalisée au premier chapitre.

Ainsi, nous avons à notre disposition un outil de travail pour traiter, dans son ensemble, le problème de la cellule de production.

L'intérêt de ce développement est multiple :

- Acquisition d'un savoir-faire en simulation
- Réalisation d'un outil adapté aux cellules flexibles
- Approche conjointe décision-simulation
- Aide à la définition des mécanismes de pilotage d'une cellule

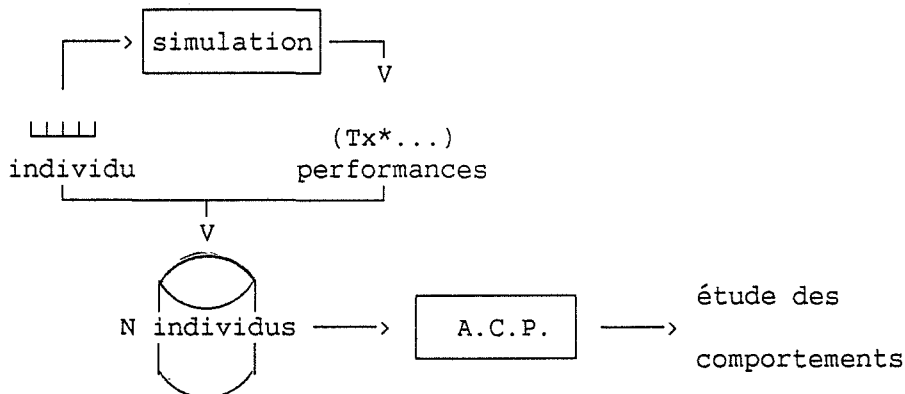
Chapitre 3

METHODOLOGIE D'EVALUATION DES REGLES DE DECISION

3.1 INTRODUCTION

Nous nous proposons de mettre en oeuvre la méthodologie d'analyse des résultats de simulations, proposée par (HERI-91), comme élément d'aide à l'évaluation des politiques de gestion de cellules de production.

Le schéma suivant résume le principe de notre démarche :



3.2 BANC TEST

Pour évaluer les performances des algorithmes présentés, nous avons mis en place un banc de tests composé de trois jeux d'essais. Chaque jeu se caractérise par le programme de production associé.

3.2.1 Structure de la cellule

Le modèle d'atelier est établi à partir d'un cas réel de cellule de production (CONE-90). Cette cellule est destinée au travail du verre. Elle est constituée de six machines et de quinze postes de stockage.

- 1 poste de chargement/déchargement (Chgt/Dchgt)
- 1 poste de DOUCI en ébauche (Douci 1)
- 1 poste de DOUCI en semi-finition (Douci 2)
- 2 machines de polissage identiques (Poli 1 & Poli 2)
- 1 machine de lavage (Lavage 1)

Le poste de chargement/déchargement, appelé aussi poste manuel, n'est disponible que durant une période de 16 h (1600 Centièmes d'heure (Ch)), tandis que les autres postes fonctionnent en continu.

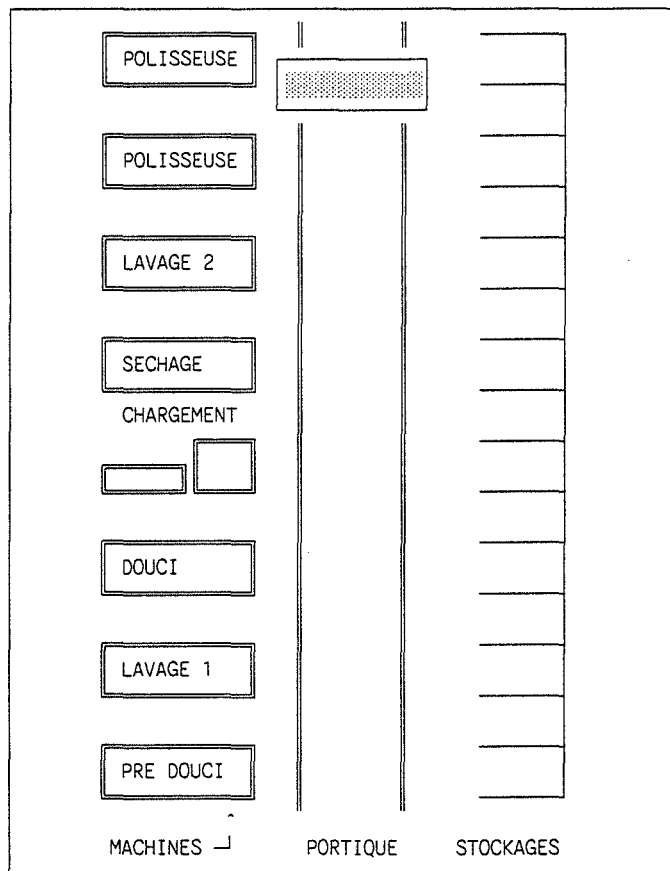


Figure 3.1: Plan d'implantation cellule

Position des postes de travail par rapport à l'origine du portique.

Poste	position
Douci 1	1.00 m
Douci 2	2.32 m
Lavage 1	3.90 m
Chgt/Dchgt	7.54 m
Poli 1	9.70 m
Poli 2	10.44 m

Les 15 postes de stockage, permettant de stocker les montages vides ou les montages pleins en attente d'opération, sont situés face aux machines, tous les 0.8 m à partir de 1 m.

Un portique à double accès réalise tous les déplacements de pièces dans cette cellule. Sa vitesse maximale est de 18.00 m/Ch tandis que l'accélération est de 325 m/Ch².

3.2.2 Production de la cellule

La production de base à réaliser sur la cellule est constituée de prismes d'épiscope en verre minéral de dimension moyenne de 200 * 150 * 80 sur lesquels généralement 3 faces doivent être "doucies" et "polies".

La cellule est capable de produire 1800 prismes/mois pour une utilisation en 3*8 heures.

Hormis la production de base, la cellule peut également assurer tous travaux de polissage de verre plan dans des dimensions pouvant aller jusqu'à 400 * 400 * 200 et des précisions de planéité inférieures à 2 franges sur un diamètre de 50 mm.

Le lancement de la production s'effectue par CAMPAGNE d'environ 100 prismes.

Pour notre banc test, nous avons choisi la réalisation de deux produits, baptisés G_CAB et G_CAB_F. Les gammes associées sont les suivantes :

G_CAB			G_CAB_F		
Lieu opératoire	Durée face usinée		Lieu opératoire	Durée face usinée	
Chgt/Dchgt	20.00	C	Chgt/Dchgt	20.00	C
Douci 1	6.70	C	Douci 1	6.70	C
Douci 2	10.50	C	Douci 2	10.50	C
Lavage 1	3.00	C	Lavage 1	3.00	C
Poli 1 ou 2	61.50	C	Poli 1 ou 2	34.50	C
Chgt/Dchgt	8.00	C	Chgt/Dchgt	8.00	C
Chgt/Dchgt	20.00	A	Chgt/Dchgt	20.00	A
Douci 1	8.40	A	Douci 1	8.40	A
Douci 2	10.50	A	Douci 2	10.50	A
Lavage 1	3.00	A	Lavage 1	3.00	A
Poli 1 ou 2	76.50	A	Poli 1 ou 2	51.50	A
Chgt/Dchgt	8.00	A	Chgt/Dchgt	8.00	A
Chgt/Dchgt	20.00	B	Chgt/Dchgt	20.00	B
Douci 1	10.00	B	Douci 1	10.00	B
Douci 2	8.40	B	Douci 2	8.40	B
Lavage 1	3.00	B	Lavage 1	3.00	B
Poli 1 ou 2	81.50	B	Poli 1 ou 2	51.50	B
Chgt/Dchgt	8.00	B	Chgt/Dchgt	8.00	B

Nota : 1'unité de temps est le centième d'heure (Ch)

A un type de face à usiner, nous devons utiliser un type de montage. A partir des études de dimensionnement, nous avons déduit un nombre optimum de trois montages disponibles par type de face.

* Constitution des simulations

Les deux jeux d'essais, D1 et D3, produisent un seul type de pièces, respectivement G_CAB et G_CAB_F, sous trois formes différentes, usinages de trois, deux ou une faces.

Les quantités demandées sont :

	Nombre de faces usinées	Nombre de pièces demandées
Pièce 1	3 (C,A,B)	120
Pièce 2	2 (A,B)	60
Pièce 3	1 (B)	30

Le jeux d'essai D5 est un mixage des deux premiers.

	Nombre de faces usinées	Nombre de pièces demandées
Pièce 1 G_CAB	3 (C,A,B)	180
Pièce 2 G_CAB_F	3 (C,A,B)	120
Pièce 3 G_CAB	1 (B)	30

Nous avons utilisé cette méthode de constitution de planning, totalement empirique, mais correspondant à une production dans laquelle nous injectons des produits à divers stades d'avancement. ceci peut correspondre à une reprise d'usinage, cependant, dans les résultats nous retrouvons cet aspect aléatoire de constitution du programme de production.

* Charges de production

Les charges de production effectives sont fournies dans le tableau ci-dessous. Pour déterminer quel est le véritable poste goulot, il est nécessaire de prendre en compte les arrêts de production.

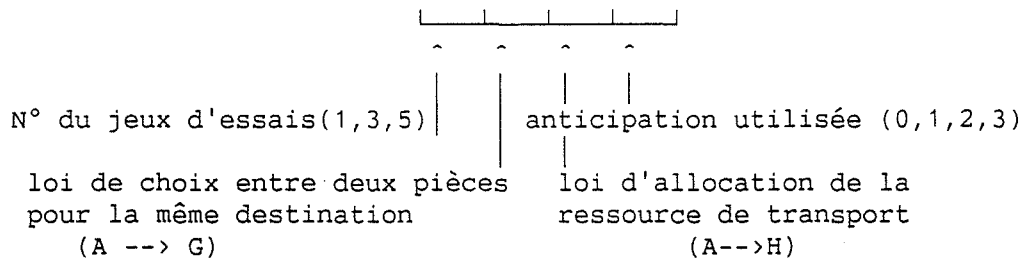
Poste	Charges de D1	Charges de D3	Charges de D5
Douci 1	4416 Ch	4416 Ch	7830 Ch
Douci 2	4914 Ch	4914 Ch	9072 Ch
Lavage 1	1530 Ch	1530 Ch	2790 Ch
Poste manuel	14280 Ch	14280 Ch	26040 Ch
Poli 1	11340 Ch	17910 Ch	28005 Ch
Poli 2	"	"	"

Le poste manuel étant arrêté durant les périodes de veille, nous trouvons une durée minimum nécessaire, sur ce poste, de :

Charges de D1	Charges de D3	Charges de D5
20680 Ch	20680 Ch	28840 Ch

3.3 NOMENCLATURE DES SIMULATIONS

Pour un jeu d'essai, nous testons l'application de diverses lois de gestion du transporteur et des produits. De plus, nous observons le comportement du système face à un choix de l'anticipation. Ainsi, chaque simulation est identifiée par quatre caractères spécifiant les conditions de test.



* L'anticipation

4 conditions sont testées (0,1,2,3). Elles diffèrent par le temps d'anticipation maximum autorisé (TA_{Max}). Nous avons utilisé les valeurs suivantes :

Table 3.1: Valeurs de l'anticipation

N° d'anticipation	Valeur de TA_{Max}
0	0.0 Ch
1	0.7 Ch
2	1.4 Ch
3	2.1 Ch

Ces valeurs ne sont pas choisies au hasard. Elles dépendent, en fait, du temps moyen de réalisation d'un déplacement, qui lui même est égal à 0.77 Ch.

* La gestion des pièces

Nous testons 8 règles de choix des pièces sur les machines ou sur les postes de stockage. Ces règles permettent de régir les logiques des décisions D02 et D03 (Cf. 1° Chapitre).

Table 3.2: Règles de choix des pièces

Lettre caractéristique	Loi associée	principe
A	Introduction	Sélectionne la pièce la plus ancienne
B	FIFO	Sélectionne la première pièce disponible sur la ressource considérée
C	LIFO	Sélectionne la dernière pièce disponible sur la ressource considérée
D	SPT	Sélectionne la pièce dont le temps d'usinage de l'opération suivante est le plus court.
E	LPT	Sélectionne la pièce dont le temps d'usinage de l'opération suivante est le plus long
F	Due Date	Sélectionne la pièce dont la date de livraison est la plus proche
G	Slack/Opn	Sélectionne la pièce dont le temps d'inactivité restant, divisé par le nombre d'opérations, i.e. la marge relative, est le plus court

Nous avons sélectionnés ces lois car elles constituent un éventail des différentes natures de règles.

- Règles primaires (A,B,C) ; correspondant à une gestion simple, voire contrainte pas des éléments techniques.
- Règles liées aux opérations (D,E)
- Règles introduisant la notion de délai de livraison (F,G)

Ces règles sont utilisées à deux niveaux. Dans le cas d'une allocation classique de la ressource de transport (notée A), elles permettent de choisir, pour une même classe de déplacements, le plus prioritaire. Dans le cas des autres règles d'allocations (notée B à H) elles permettent de choisir entre deux pièces ayant la même destination.

* Allocation du transport

Nous avons testé 8 règles d'allocation du transporteur. Elles déterminent le nouveau déplacement que doit réaliser le portique.

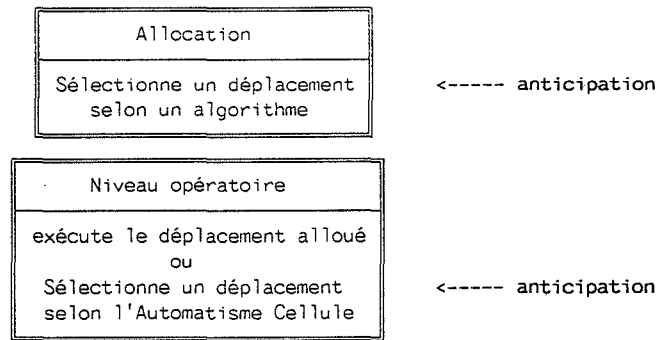
Table 3.3: Règles d'allocation du moyen de transport

Lettre caractéristique	Loi associée	Principe
A	Classe de déplacements	Exécute le déplacement le plus prioritaire de la classe la plus prioritaire
B	Introduction	Sélectionne le déplacement qui concerne la pièce la plus ancienne dans l'atelier
C	SPT	Sélectionne le déplacement le plus court en durée
D	LPT	Sélectionne le déplacement le plus long en durée
E	Due Date	Sélectionne le déplacement qui concerne la pièce la plus en retard
F	Slack/Opn	Sélectionne le déplacement qui concerne la pièce de marge relative minimum
G	Trans_1	Minimise le temps total de transport
H	Trans_2	Minimise l'attente totale de la ressource de transport

Tous comme les pièces, ces règles sont un éventail des potentialités de choix associé au transport. Nous déterminons, de nouveau, trois classes :

- Règles liées la nature des ressources (A)
- Règles liées au flux de matières (E,F)
- Règles orientées vers la gestion de la ressource de transport (C,D,G,H)

Nota : Rappelons que les règles de pilotage du système de transport réalisent les déplacements demandés ou établis par déduction logique. Ainsi, le traitement par classes de déplacement confond pilotage et gestion du transport, tandis que les autres méthodes constituent deux niveaux de décisions, comme nous l'indiquons sur le schéma ci-dessous :



L'anticipation se retrouve aux niveaux opératoire et décisionnel.

3.4 VARIABLES DE MESURE DES PERFORMANCES

Nous avons établi un ensemble exhaustif de variables de performances. Il se compose d'une quinzaine de variables. Elles sont réparties en deux classes, selon qu'elles reflètent l'utilisation des moyens de production ou les temps d'exécution des produits. La liste suivante décrit ces variables.

- Txma (Taux d'occupation du poste manuel) : détermine le niveau d'utilisation du poste reconnu comme goulot d'étranglement.
- Txp1, Txp2 (Taux d'occupation des deux polisseuses) : indiquent l'utilisation des postes les plus chargés après le poste manuel.
- Tbma (Temps de blocage du poste manuel, i.e. encombré d'une pièce) indique une bonne ou mauvaise évacuation de ce poste.
- Tbp1, Tbp2 (Temps de blocage des polisseuses) : Idem à Tbma.
- TbDO (Temps de blocage de douci 2) : Idem à Tbma, permet de sonder l'importance apportée à cette machine dont la charge est minimum.
- Trsp (Temps total d'utilisation du transporteur) : indicateur de l'efficacité des règles d'allocation du portique.
- CyC1, CyC2, CyC3 (Temps de cycle moyen de chaque type de pièce) : indiqueraient le niveau de fluidité moyen des produits dans l'atelier.

- Ect1, Ect2, Ect3 (Ecart type des temps de cycles) : relève la répartition de la fluidité.
- TpTo (Temps total de fabrication ou MAKESPAN) : synthétise l'ensemble des variables indiquant l'emploi des ressources de fabrication.

Justification des variables

En ce qui concerne les produits, rappelons le, nous préférons le temps de cycle aux mesures de retard ou d'avance pour deux raisons :

- La notion de retard ou d'avance est liée à la demande client. Ce point est essentiel dans la réalité, mais ne permet pas d'analyser le comportement du système de production.
- Nous considérons que, si nous sommes capables de contrôler les cycles produits, alors il est plus aisé d'indiquer au client les délais de réalisation de leur commande.

3.5 CONSTITUTION D'UNE METHODE D'ANALYSE DES RESULTATS

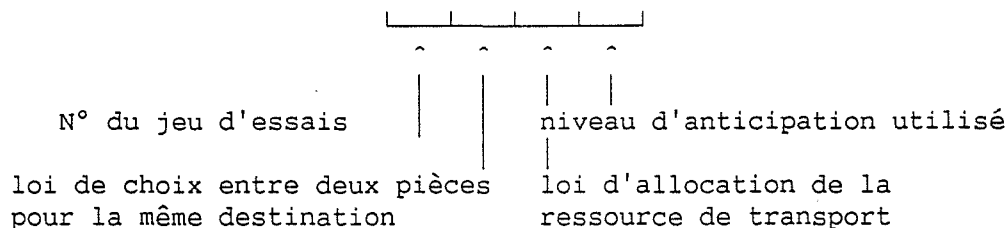
3.5.1 La méthode ACP

Pour distinguer la tendance de chacune des règles de gestion, nous avons employé une méthode d'analyse en composantes principales ACP (module ANCOMP de la bibliothèques d'analyse de données ADDAD). Cette méthode permet de réaliser une analyse multi-critères sur un ensemble d'individus, en l'occurrence nos N simulations d'un jeu d'essais. Les résultats, qualitatifs, tirés de cette analyse vont constituer un support d'évaluation des performances de notre cellule. Rappelons le principe de cette méthode.

Principe

A Chaque simulation, ou individu, nous associons P variables, correspondant aux critères d'évaluation de performances.

Une simulation est identifiée par 4 caractères indiquant les conditions de test employées.



Nous cherchons à évaluer le niveau de performance de chaque individu, l'effet d'une loi ou l'interactivité entre plusieurs loi de chaque individu.

Ayant P variables, nous devons positionner chaque individu dans un espace à P dimensions. Ces N individus engendrent un nuage à N points, que nous souhaitons visualiser pour en connaître les formes, et ainsi, les tendances à améliorer ou dégrader tel ou tel critère.

Pour réduire le problème, les méthodes d'Analyse en Composantes Principales , ACP, vont rechercher un sous-espace de projection de dimension inférieure à P dans lequel nous pouvons observer un maximum d'informations sans déformation excessive du nuage ainsi projeté. Notons que la méthode réduit chaque variable par division avec le carré de la variance. Ceci permet de comparer des données sans dimension physique.

Les axes, composant ce sous-espace de projection, sont orientés suivant les variables ayant les variations relatives maximum. Ils indiquent successivement l'information la plus pertinente.

Nous notons g le point moyen, ou centre de gravité du nuage. Les coordonnées de ce point sont les moyennes, pour chaque variable, de l'ensemble de nos individus.

Méthode de travail

Chaque graphique obtenu est donc une représentation de notre nuage de points dans un sous-espace à deux dimensions. L'étude des tableaux, fournis conjointement, nous apporte l'information nécessaire à l'interprétation de ces graphiques.

Analyse des tableaux de résultats

Prenons l'exemple des résultats du jeu d'essais D5 avec perturbations.

Nous obtenons les trois tableaux suivants :

Table 3.4: Matrice de corrélations

(Tous les coefficients sont multipliés par 1000)

	Txma	Txp1	Txp2	Tbma	Tbp1	Tbp2	TbD0	Trsp	CyC1	TpTO
Txma	1000									
Txp1	977	1000								
Txp2	984	924	1000							
Tbma	-402	-331	-447	1000						
Tbp1	-267	-283	-245	-182	1000					
Tbp2	-255	-269	-235	-162	945	1000				
TbD0	-162	-209	-117	-530	687	657	1000			
Trsp	-525	-560	-478	-311	138	126	349	1000		
CyC1	332	358	300	242	-275	-267	-331	-511	1000	
TpTo	-999	-974	-984	423	256	244	142	510	-310	1000

Cette matrice met en évidence les variables qui ont tendance à varier de façon similaire, ou en opposition. Par exemple, le coefficient +977 entre Txp1 et Txma, indique que ces deux variables sont fortement corrélées et qu'elles évoluent dans le même sens. Par ailleurs, la valeur -999 entre TpTo et Txma, indique toujours une corrélation très élevée entre les deux variables, mais une variation en opposition ; quand TpTo prend de grandes valeurs, alors Txma diminue.

Table 3.5: Les valeurs propres

NUM	ITER	VAL PROPRE	POURCENT	CUMUL	*	HISTOGRAMME DES VALEURS PROPRES DE LA MATRICE			
1	0	4.85390	48.539	48.539	*	*****	*****	*****	*****
2	1	2.64932	26.493	75.032	*	*****	*****	*****	*****
3	1	1.36377	13.638	88.670	*	*****	*****	*****	*****
4	1	.58818	5.882	94.552	*	*****	*****	*****	*****
5	2	.27117	2.712	97.263	*	*****	*****	*****	*****
6	2	.15102	1.510	98.774	*	*****	*****	*****	*****
7	2	.06739	.674	99.447	*	*****	*****	*****	*****
8	5	.05398	.540	99.987	*	*****	*****	*****	*****
9	3	.00121	.012	99.999	*	*****	*****	*****	*****
10	1	.00007	.001	100.000	*	*****	*****	*****	*****

Pour analyser le second tableau, rappelons que les axes factoriels sont composés à partir des vecteurs propres associés à chacune des valeurs

propres de la matrice des corrélations. L'ordre des axes est donné par celui des valeurs propres classées par ordre décroissant.

Qualitativement, ce tableau nous permet d'évaluer la part d'information contenue dans chacun des axes factoriels. La 3° colonne (POURCENT) précise cette part d'information, tandis que la 4° (CUMUL) permet de conclure quant à l'importance de l'information contenue dans le sous-espace de projection utilisé. C'est pourquoi les trois premiers axes sont représentatifs de 88,67 % de l'information générée par nos simulations. En rapportant cette donnée à notre nuage de points, cela signifie que sa forme est dominante dans un espace à 3 dimensions, et non plus à 10.

Table 3.6: Composition des axes factoriels

	J1	QLT POID INR		1#F COR CTR			2#F COR CTR			3#F COR CTR			4#F COR CTR			5#F COR CTR		
1	Txma	996	4 100	-953	908	187	288	83	31	-16	0	0	55	3	5	-42	2	7
2	Txp1	959	4 100	-948	898	185	229	52	20	29	1	1	75	6	9	-46	2	8
3	Txp2	967	4 100	-925	855	176	326	106	40	-52	3	2	38	1	2	-37	1	5
4	Tbma	923	4 100	213	45	9	-764	584	220	499	249	183	212	45	76	-5	0	0
5	Tbp1	971	4 100	492	242	50	696	484	183	472	223	163	65	4	7	-134	18	66
6	Tbp2	975	4 100	478	229	47	684	468	177	488	238	174	87	8	13	-180	33	120
7	TbD0	972	4 100	393	154	32	802	642	242	8	0	0	-232	54	91	349	122	449
8	Trsp	968	4 100	624	389	80	166	27	10	-652	425	311	-205	42	71	-291	85	312
9	CyC1	1000	4 100	-489	239	49	-326	107	40	474	225	165	-650	422	717	-87	8	28
10	TpT0	996	4 100	945	894	184	-309	95	36	30	1	1	-63	4	7	38	1	5
			1000			1000			1000			1000			1000			1000
			(1)			(2)			(3)			(4)						

Le troisième tableau permet de distinguer la nature de chacun des axes. Nous devons l'interpréter comme suit :

- Colonne (1), QLT : C'est la qualité de représentation de la variable dans le sous-espace de projection sélectionné par la méthode ACP. Une valeur élevée indique une bonne représentation. Une variable dont les variations ont été sensibles que pour un très petit nombre d'individus risque d'être mal représentée. Ceci est indiqué par une valeur faible de la qualité. Notons que la qualité se répartit suivant chacun des axes (Cf. Colonne 3).

Soit i l'élément et k l'indice d'axe

$$k = N$$
$$QLT(i) = \sum_{k=1} COR(i,k)$$

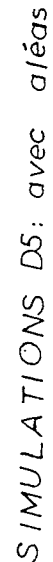
- Colonne (2), 1#F : C'est la coordonnée factorielle de l'élément à l'axe. Ici, nous obtenons les coordonnées de chaque variable, par rapport à l'axe 1. Cette information permet de déterminer le sens de variation de la variable lorsque nous nous déplaçons suivant cet axe. Par exemple, Txma, de coordonnée -953, augmente lorsque nous nous dirigeons vers le sens négatif du premier axe. De même, TpTo, coordonnée 945, augmente suivant le sens positif du même axe.
- Colonne (3), COR : Contribution de l'axe à l'élément. Cette donnée permet d'affirmer que la variable (ou élément) associée est bien représentée, ou non, lorsque nous nous déplaçons suivant cet axe. C'est la décomposition de la qualité sur cet axe.

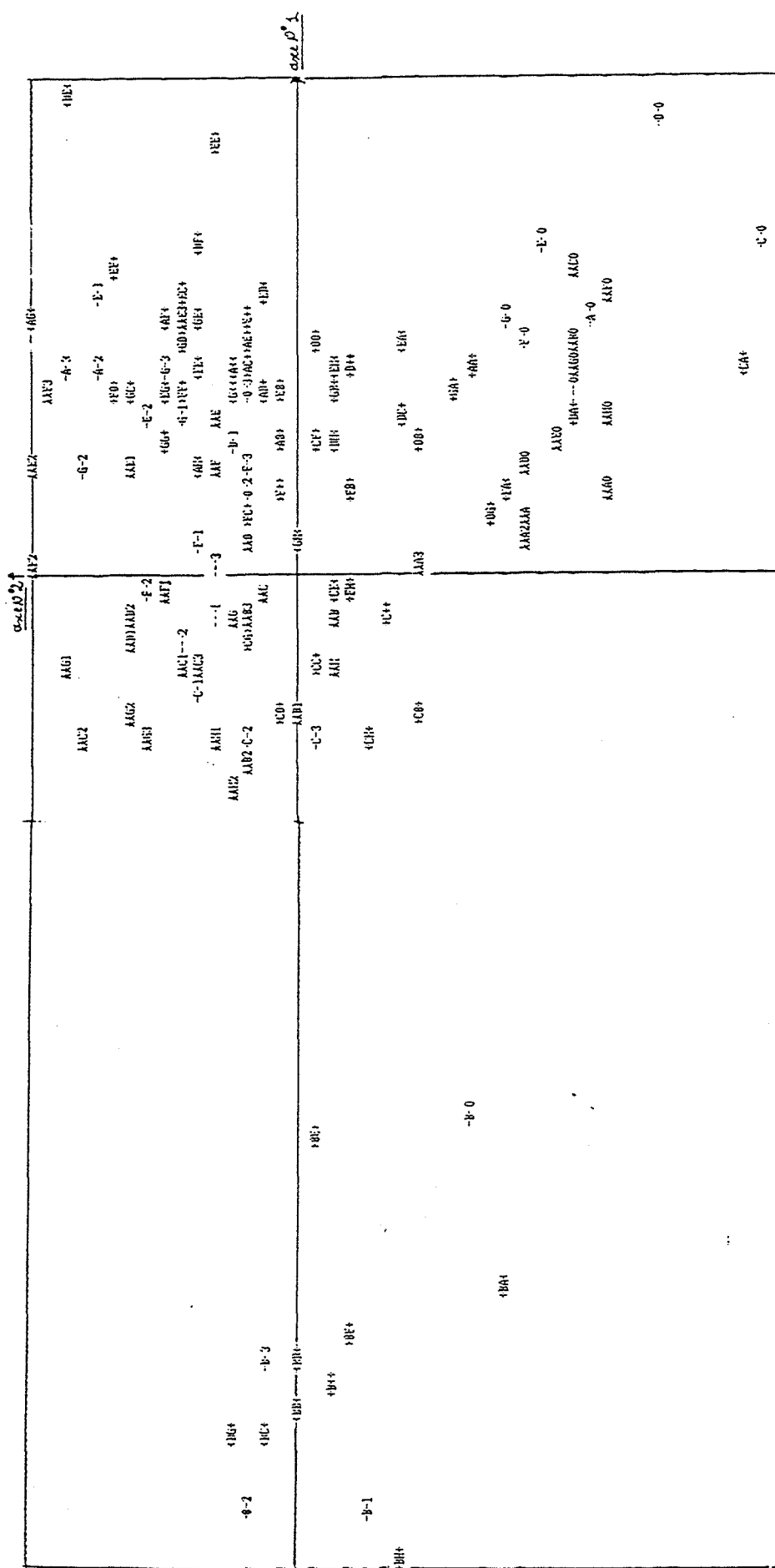
Par exemple, Txma, dont $COR(txma,1) = 908$, est représenté à 90,8% par le premier axe. Alors que $COR(Tbma,1)=45$ signifie que le temps de blocage du poste manuel est représenté qu'à 4,5% par ce même axe.

- Colonne (4), CTR : Contribution de l'élément à l'axe. Cette donnée complémentaire de la précédente, informe sur le rôle que l'élément (ou variable) a joué pour composer chaque axe.

Par exemple, l'axe 1 est composé à 18,7 % par Txma, et à 73,2% par l'ensemble des 4 variables (Txma, Txp1, Txp2 et TpTo). Le total sur l'ensemble des variables est donc de 100%.

En résumé, de la colonne (2) nous déduisons le sens de variation de la variable, tandis que les colonnes (3) et (4) permettent d'évaluer la pertinence de cette variable suivant l'axe étudié.





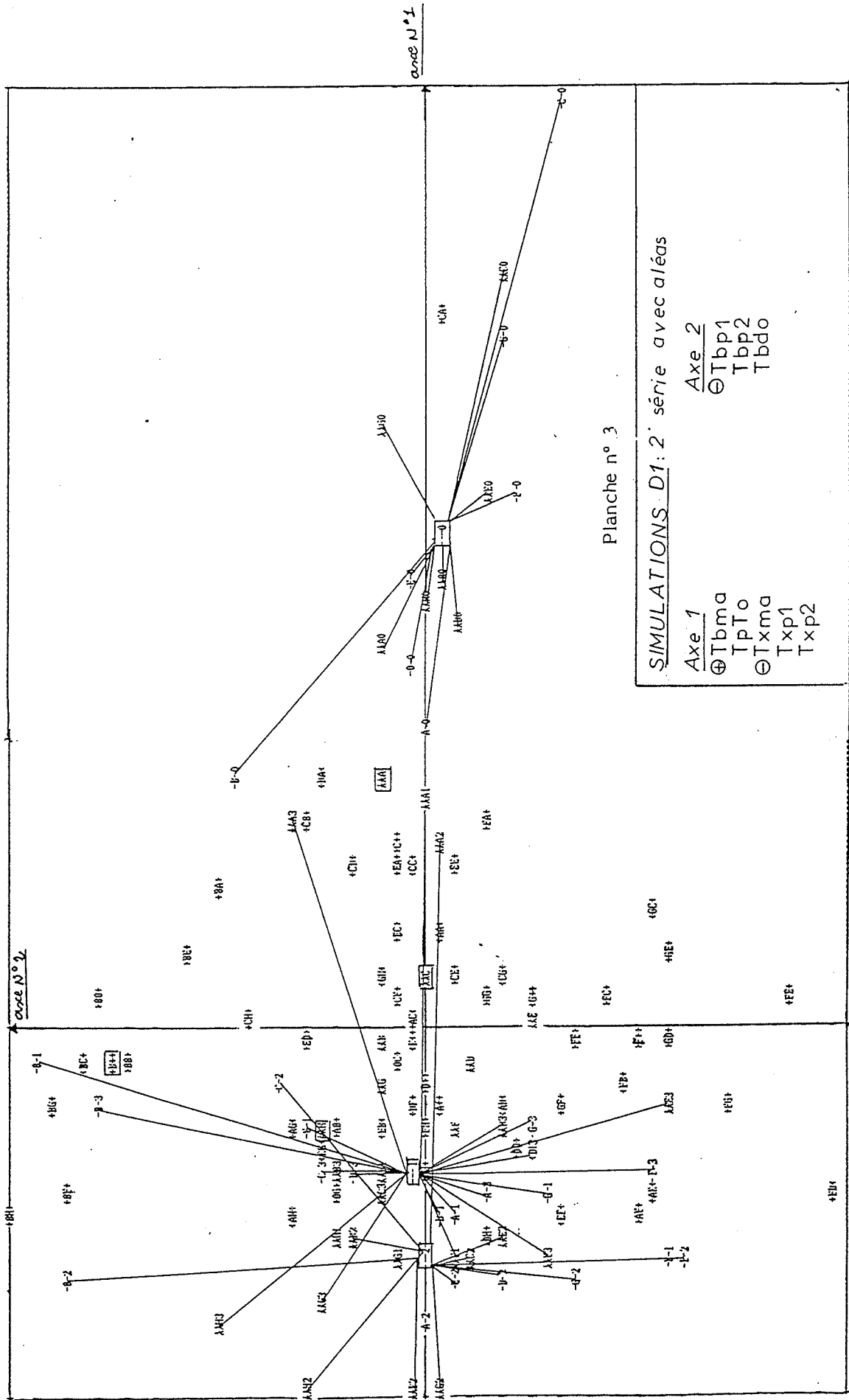
NUMERO DE POINTS SUPERPOSÉS : 7

465(417) - E-3(461) AUC(417) - A-1(461) AUC(462) 465(461) AUC(461)

SIMULATION D5 : 2^e série avec aléas

<u>Axe 1</u>	<u>Axe 2</u>
⊕ T _{p10}	⊕ T _{bp1}
⊖ T _{xm}	T _{bp2}
T _{xp1}	
T _{xp2}	

Planche N°2



ORDRE DE POINTS SUPERIEURS : 1

ORDRE DE POINTS SUPERIEURS : 10

AAC1(-B-3) AAC2(C-4) AAC3(C-4) AAC4(-B-1) AAC5(-B-1) AAC6(AA-1) AAC7(AAC7) AAC8(A-3) AAC9(-E-0) AAC10(-B-3) AAC11(C-4) AAC12(-B-1) AAC13(-B-1) AAC14(AA-1) AAC15(AAC15) AAC16(A-3) AAC17(-E-0) AAC18(-B-3) AAC19(C-4) AAC20(C-4) AAC21(-B-1) AAC22(-B-1) AAC23(AA-1) AAC24(AAC24) AAC25(A-3) AAC26(-E-0) AAC27(-B-3) AAC28(C-4) AAC29(C-4) AAC30(-B-1) AAC31(-B-1) AAC32(AA-1) AAC33(AAC33) AAC34(A-3) AAC35(-E-0) AAC36(-B-3) AAC37(C-4) AAC38(C-4) AAC39(-B-1) AAC40(-B-1) AAC41(AA-1) AAC42(AAC42) AAC43(A-3) AAC44(-E-0) AAC45(-B-3) AAC46(C-4) AAC47(C-4) AAC48(-B-1) AAC49(-B-1) AAC50(AA-1) AAC51(AAC51) AAC52(A-3) AAC53(-E-0) AAC54(-B-3) AAC55(C-4) AAC56(C-4) AAC57(-B-1) AAC58(-B-1) AAC59(AA-1) AAC60(AAC60) AAC61(A-3) AAC62(-E-0) AAC63(-B-3) AAC64(C-4) AAC65(C-4) AAC66(-B-1) AAC67(-B-1) AAC68(AA-1) AAC69(AAC69) AAC70(A-3) AAC71(-E-0) AAC72(-B-3) AAC73(C-4) AAC74(C-4) AAC75(-B-1) AAC76(-B-1) AAC77(AA-1) AAC78(AAC78) AAC79(A-3) AAC80(-E-0) AAC81(-B-3) AAC82(C-4) AAC83(C-4) AAC84(-B-1) AAC85(-B-1) AAC86(AA-1) AAC87(AAC87) AAC88(A-3) AAC89(-E-0) AAC90(-B-3) AAC91(C-4) AAC92(C-4) AAC93(-B-1) AAC94(-B-1) AAC95(AA-1) AAC96(AAC96) AAC97(A-3) AAC98(-E-0) AAC99(-B-3) AAC100(C-4)

3.5.2 Analyse des graphiques

A ces tableaux, nous devons associer les graphiques de projection comme celui présenté en planche 1. Sur celui-ci, chaque simulation de la série D5, est positionnée dans le plan de projection composé des deux premiers axes factoriels.

Notons que, pour l'exemple, les tableaux présentés ci-dessus, correspondent à la planche 1.

Nous déduisons des tableaux que l'axe 1 est orienté suivant les variations des variables Txma, Txp1, Txp2, TpTo, tandis que le second suit les variables Tbma, Tbdo, et à moindre mesure, Tbp1 & Tbp2. Le troisième est représentatif des variations du temps total de transport Trsp.

L'interprétation de cette analyse est multiple :

- En premier lieu, nous visualisons rapidement les cas performants. i.e. ceux situés à gauche du graphique, puisque vers cette zone TpTo diminue et les temps d'occupation "machine" augmentent.
- Par ailleurs, lorsque nous nous plaçons vers les valeurs positives du second axe, nous trouvons des simulations qui diminuent le temps de blocage du poste manuel mais augmentent celui des autres machines.
- En première analyse de notre nuage, les temps de blocage machine et le temps total de fabrication sont faiblement corrélés dans cette série d'essais.

Nous pouvons, ainsi, comparer qualitativement les performances d'une simulation par rapport aux autres, et en tirer quelques conclusions.

Nota : La méthode insiste sur la méfiance à avoir vis-à-vis des individus proches du centre de gravité du nuage, car peu significatifs.

Les centres de gravité secondaires

Pour synthétiser l'effet de nos lois, nous plaçons, dans l'espace factoriel, les points moyens de simulations ayant une ou deux hypothèses en commun. Ces points sont appelés centres de gravité secondaires.

Par exemple, le point **A est le centre de gravité des simulations ayant utilisé la loi d'allocation du transport "A". De même, le point **E1 est le point moyen des simulations du type *xE1 avec x variant de A à G.

Ce regroupement simplifie la représentation, et permet de distinguer le comportement moyen de chaque hypothèse, ainsi que l'interaction entre chaque règle.

La planche n° 2, associée à la première, nous permet de tirer quelques conclusions :

- Dans la zone favorable, nous découvrons les effets de la lois +B++ dont le comportement est amélioré par l'association des lois ---2 ou **H. En effet, en revenant à la planche n° 1 nous découvrons que le point 5BH2 est à l'extrémité de notre graphique.
- A l'inverse, le manque d'anticipation combiné à un mauvais choix des pièces (-C-0) entraîne vers une zone peu favorable aux résultats souhaités.

Représentation en étoile

Pour assister l'analyse des centres de gravité secondaires, nous avons accompagné certains graphismes d'une représentation des liaisons entre les centres de gravités. Ce sont les diagrammes en étoiles de la planche n° 3. Ceci permet de mieux situer l'influence de chacune des hypothèses de simulation.

Dans le cas de cette planche (Nota : simulations de type D1), nous avons représenté les diverses hypothèses d'anticipation et les "étoiles" associées. Nous pouvons, ainsi, constater les effets positifs de

l'anticipation ---2, valables pour l'ensemble des cas, puisque l'étoile se situe dans une zone étroite. Tandis que l'absence d'anticipation, ---0, déjà aux effets négatifs, s'éparpille. Ce qui est tout de même souhaitable, puisque un système de production, où l'anticipation n'est pas réalisable, peut être corrigé par l'application d'autres règles de décision.

3.5.3 Qualification des observations

Pour qualifier chaque règle, à partir des résultats obtenus, nous utilisons les termes suivants :

Influenable : C'est à dire sensible à l'emploi des règles conjointes.

Voyageuse : Se situant à des positions relatives, au sein du nuage, pouvant varier d'un jeu d'essai à l'autre.

Performante : Qui améliore les variables des performances étudiées.

3.5.4 Composition des axes factoriels

Dans chacun des jeux d'essais, l'information contenue dans les trois premiers axes est la suivante :

Axe 1 : Variation de TpTo inversement avec Txma, Txp1, Txp2 et Tbma.

Axe 2 : Variation du blocage des postes de polissage

Axe 3 : Variation du temps de transport

Malheureusement, les variables relatives à la fluidité du système ne sont pas représentées. Ceci peut être dû au choix des dates de lancement en production. Pour affiner l'analyse, dans un premier temps, nous les avons ignorées. Ce phénomène pouvait être prévisible, car il met en oeuvre des règles visant à améliorer les performances des moyens de production. Ce qui, dans la majorité des cas écarte l'aspect circulation des produits.

Nous remarquons donc que les variables (Txp1, Txp2, Txma) sont fortement corrélées avec TpTo. Ce phénomène est logique, puisqu'il confirme le fait que "mieux les machines sont engagées (Tx* élevé), plus rapidement la production est réalisée (TpTo faible)".

Nous constatons, aussi, que le temps de blocage du poste manuel (Tbma) est lié aux variables (Tx* et TpTo). Ceci confirme les propos tenus par la méthode OPT. En effet, à partir du calcul des charges de production, nous remarquons que le poste manuel est goulot d'étranglement. Ce poste est donc représentatif du rythme de la cellule.

Finalement, par le fait que les variables Tbp1 et Tbp2 sont représentées de façon similaire sur le second axe, nous pouvons déduire que les deux machines identiques sont desservies de façon équiprobable.

3.6 PERFORMANCES DE LA CELLULE "IDEALE"

L'anticipation du transport

Nous constatons "le besoin d'anticiper". Les centres de gravités ---1, ---2, et ---3 sont nettement démarqués de ---0. Ils se positionnent dans une zone favorable à la diminution du Makespan (TpTo).

Le centre ---2 est relativement meilleur à ---1 et ---3. Ceci pouvait être prévisible, puisque son temps maximum d'anticipation est le double du temps moyen de déplacement. Ainsi, dans ce temps maximum, le transporteur peut aller chercher une pièce sur un moyen de stockage et l'apporter au pied de la machine qui va bientôt terminer.

L'anticipation est influençable par certaines règles peu performantes, ou voyageuses :

- La méthode d'allocation du transporteur "A" entraîne vers une zone où le Makespan augmente considérablement (Centres **A1, **A2, **A3).

- La loi FIFO de choix d'une pièce, loi voyageuse, recentre le phénomène d'anticipation.

En règle générale, nous remarquons qu'une anticipation de temps maximum correspondant au double du temps moyen de déplacement est la plus performante. Cependant, elle doit être supportée par une règle complémentaire d'allocation du transporteur.

Règles de choix des pièces

L'étude des règles de choix de pièces est peu probante, puisqu'elle est essentiellement orientée vers la fluidité des produits, et que d'autre part, nous n'obtenons pas de résultats significatifs quant à cette fluidité.

Cependant, nous pouvons déjà émettre quelques conclusions relatives à l'utilisation de ces règles.

Tout d'abord nous observons nettement l'aspect voyageur de la loi FIFO, notée +B++, par rapport au premier axe. Peu performante pour les essais D1 et D3, elle contribue à l'amélioration du système de production en D5. Ce phénomène peut se justifier par la simplicité de cette loi. Elle tend à canaliser les flux de production, en limitant les dépassements de produits au sein de la cellule.

Notons, aussi, que cette loi minimise notablement, dans les trois cas, les temps de blocage des deux polisseuses, ainsi que le temps total de transport (second et troisième axes).

La loi LIFO, notée +C++, nous présente toutes ces caractéristiques néfastes : elle dégrade les performances du système quelle que soit la règle conjointe.

Les autres lois se positionnent de façon proche du centre de gravité. Leurs effets sont donc limités. Nous relevons tout de même, le comportement relativement stable des lois SPT, Due Date et Slack/Opn.

Nous reviendrons sur ces remarques lors de l'étude des simulations plus représentatives de l'effet de ces lois sur la circulation des produits.

Règles d'allocation du transport

Les règles d'allocation du transporteur se distinguent relativement bien les unes des autres. Ceci montre clairement l'inter-dépendance entre les moyens mis en oeuvre dans la cellule de production.

Tout d'abord, nous montrons sur nos plans de projection, que la règle d'allocation par classes de déplacement, notée **A, possède un comportement défavorable. Tout comme la loi LIFO, elle nous entraîne vers un domaine de valeurs peu souhaitable, où le temps total de fabrication est élevé.

Par ailleurs, nous obtenons des résultats favorables lorsque nous employons la loi LPT sur les temps de déplacement. Ceci peut être rapporté à "l'effet cascade" qui pousse le système de transport à desservir les moyens les plus proches les uns des autres. La loi LPT contre-balance cela en forçant le transporteur à servir les moyens les plus éloignés.

En second lieu, nous trouvons la loi Trans_1, notée **G, qui, par le biais de la minimisation du temps total de déplacement, minimise le temps total de fabrication. Trans_1 apporte de meilleurs résultats que LPT. Cependant, son caractère plus orienté transport se ressent, puisqu'elle se laisse supplanter par des lois plus polyvalentes telles que Trans_2.

Finalement, nous retenons de nos premières expériences la loi Trans_2 qui, conjointement à l'effet cascade, améliore les performances globales du système. Entre autre, le centre de gravité **H2, combinant Trans_2 et une anticipation que nous considérons optimum, se positionne toujours dans la zone la plus favorable à l'amélioration des performances.

En outre, Trans_2 doit être utilisée avec une loi de sélection des pièces correctement adaptée. En effet, cette loi est tout de même influençable, et son application mal combinée avec des lois telles que LIFO sur les pièces (+C++) dégrade les effets obtenus.

3.7 PERFORMANCES EN PRESENCE D'ALEAS

Pour vérifier la pertinence des conclusions que nous venons d'apporter sur les règles de gestion, nous devons vérifier le comportement de celles-ci face à d'autres situations de production. Pour ce faire, en un premier temps, nous avons décidé d'introduire des pannes sur l'ensemble des machines.

Table 3.7: Pannes et réparations

Poste	MTBF	MTTR
Douci 1	Triangulaire(Min = 3 h, Max = 6 h, Moy = 4 h 30)	Uniforme(Min = 10 mn, Max = 45 mn)
Douci 2	Sans panne	
Lavage 1	Sans panne	
Poste manuel	Uniforme(Min = 3 h, Max = 5 h)	Uniforme(Min = 10 mn Max = 30 mn)
Poli 1 & 2	Uniforme(Min = 5 h, Max = 6 h)	Uniforme(Min = 10 mn Max = 45 mn)

Rappel : MTBF signifie Mean Time Between Failure ou temps moyen entre deux pannes, tandis que MTTR indique le temps moyen de réparation ou Mean Time To Repair.

La méthode de génération d'aléas a été élaborée de sorte que nous étudions le comportement de chaque simulation face à une situation identique.

Anticipation du transport

La prise en compte d'aléas contribue à accentuer les effets de l'anticipation de type ---2. Elle est légèrement démarquée de ---1 et ---3. Nous expliquons ce phénomène par l'aspect Juste à Temps de cette règle. En effet, ---1 implique un délai trop court pour exécuter les actions liées à l'anticipation et ---3 augmente le risque d'allouer le transporteur à un transit entaché d'un aléa.

Notons, par ailleurs, que le comportement négatif d'une cellule sans anticipation, notée ---0, est accentué en présence d'aléas.

Règles de choix des pièces

Les lois simples de choix de pièces, telles que "Introduction" (+A++) et FIFO (+B++) montrent leur caractère simpliste. Elles sont très efficaces pour certaines configurations, et leur efficacité est accentuée en présence

d'aléas. Cependant elles comportent des effets voyageurs, et doivent être surveillées pour chaque application.

Règles d'allocation du transport

Deux lois se positionnent correctement vis à vis des performances du système de production : **F et **H.

Tout d'abord, **F, ou sélection selon la marge relative, est une loi connue pour ses effets sur le choix de pièces. Appliquée au transport, elle ces effets sont reconduits. Cependant, elle reste influençable par d'autres lois ou d'autres choix.

De préférence, nous sélectionnerons **H, appelée Trans_2. Elle contribue nettement à l'amélioration des performances, même en présence d'aléas. Elle reste tout de même perturbée lorsque nous n'appliquons pas une anticipation des transports.

3.8 CONCLUSION

Notre étude, mettant en oeuvre la méthode ACP sur un cas d'application nous amène à justifier l'emploi de règles polyvalentes, c'est à dire orientées vers l'amélioration de critères de performances relatifs à chaque moyen de production. Ainsi, une anticipation de type "2" combinée avec la loi Trans_2 et une loi SPT de choix des pièces aboutissent à de bons résultats. En présence d'aléas, cette combinaison de lois reste valable.

* Etude vis à vis des goulots

Lors de simulations où les charges sont distinctes et peu équilibrées entre machines, le phénomène de goulot apparaît clairement. En effet, nous avons constaté que le poste de chargement/déchargement était goulot. Nous pouvons relever, sur les résultats, que le taux de blocage de ce poste varie à l'opposé du temps total de production, ou MAKESPAN.

Cependant, il nous semble moins évident de tenir des propos relatifs à la gestion des goulots lorsque le système est équilibré au niveau des charges. Sur notre banc test, lorsque nous introduisons des aléas, nous

ramenons la charge du poste manuel proche de celles de polisseuses. Et ainsi, les variables d'évaluation des performances relatives au blocage constituent un axe décorrélé du premier.

* Intégration dans un schéma de pilotage

Cette approche méthodologique dans l'aide au choix des décisions (HERI-91), appliquée à un banc d'essai, complète le schéma de la fonction "PILOTE". Nous représentons, ci-dessous, ce schéma.

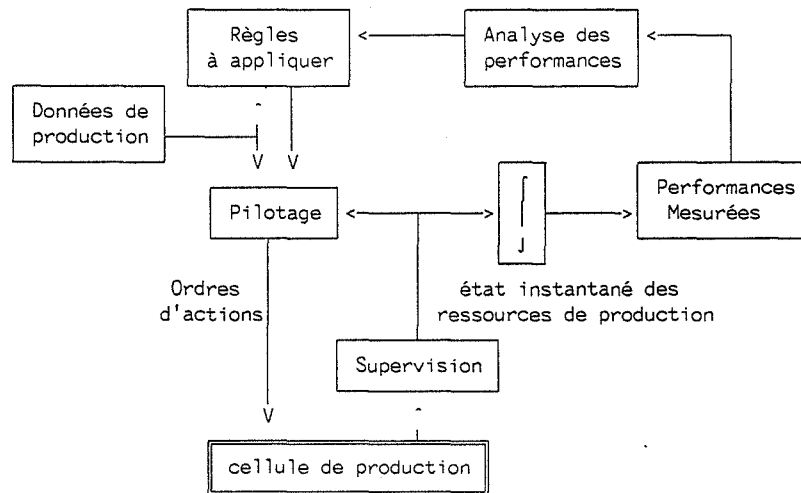


Figure 3.2: Cycle d'aide à la décision

Nous retrouvons une approche plus complète du problème dans le schéma MPECS (WU -88) présenté au 4° chapitre.

Chapitre 4

POLITIQUES DE PILOTAGE

Nous nous rendons compte que le comportement d'un moyen de production face à l'application de règles de gestion est différent d'une configuration à une autre. Cette réflexion doit donc être reportée sur la fonction "PILOTE".

Le premier chapitre nous a permis de définir les concepts de pilotage, ainsi que les divers niveaux de décisions de production, en étudiant de plus près, l'aspect opérationnel. Nous devons concevoir la mise en oeuvre de ces principes dans un contexte global de production.

4.1 PILOTAGE SANS CONTRAINTE DE GESTION

Certaines cellules de fabrication sont conçues pour fonctionner de façon automatique, sans prendre en compte des contraintes de gestion. Ces systèmes contiennent leurs propres règles de gestion, figées à la conception.

Ces cellules peuvent être flexibles, car les moyens mis en oeuvre et leur automatisme autorisent la fabrication de produits différents. Mais aucun organe logiciel ne réalise l'adéquation entre les ressources de production et les produits à réaliser.

Tout au plus, un opérateur, appelé "Pilote", décide de l'engagement des moyens de fabrication en prenant en compte tous les critères de production (ex : disponibilité des ressources machines, outils, délais de livraison des pièces, temps opératoires) et agit directement sur les mouvements de pièces dans la cellule.

Les outils logiciels mis à la disposition de l'opérateur sont, dans ce cas, du type superviseur industriel.

Evidemment, une fonction ordonnancement de production peut agir sur le lancement des pièces en entrée de cellules, résolvant une partie des problèmes de gestion abordés ici. Cependant cette fonction ne fait pas partie intégrante de l'installation.

L'adaptation de cette solution aux aspects temps réel dépend de l'opérateur. S'il est capable de conduire son unité de fabrication tout en remplissant les objectifs de production, alors nous pouvons dire que les contraintes temps réel sont remplies.

4.2 ORDONNANCEMENT DU LANCEMENT

Certains auteurs proposent de limiter le lien entre gestion et pilotage au lancement de production. (ERSC-a)(HITZ-79) établissent un lancement périodique des produits sur une cellule flexible de production. Ils déterminent des quantités de lancement minimum répondant à certains ratios de production souhaités par le responsable de production, et proposent d'engager les produits en fonction d'une période calculée à partir de l'engagement d'une machine goulot. Cette méthode optimise des critères tels que "engagement de machine" ou "délais de fabrication".

(LOZI-88) étudie le lancement en production et propose d'instaurer un indicateur de régulation de flux en entrée d'une station goulot d'étranglement.

Le lancement cadencé correspond à un carnet de commande à caractère répétitif, mais ne répond pas à une demande aléatoire. D'autre part, n'agissant que sur le lancement de production, cette solution ne peut pas être qualifiée de temps réel.

4.3 SUIVI D'UN ORDONNANCEMENT DIFFERE

D'autres cellules de fabrication sont étroitement liées à un système d'ordonnancement global de la production.

Un planning, extrait d'une gestion de type MRP ou OPT, est exploité pour engager les mouvements des pièces et des moyens de production. Un suivi de production permet, alors, de prendre en compte les aléas de fabrication au niveau de l'ordonnancement global. Un ré-ordonnancement est ainsi sensibilisé par les travaux en retard.

Cette méthode de pilotage est réalisable de façon manuelle, par l'intermédiaire d'un opérateur, ou de façon automatique, par le biais d'un logiciel de pilotage dont la partie décisionnelle consiste à suivre les ordres de fabrication. Elle possède l'avantage d'être faiblement liée aux aléas de fabrication et laisse une certaine souplesse dans les décisions de production. Mais le temps de ré-ordonnancement peut entraîner des stocks tampons entre les moyens de production.

4.4 PILOTAGE SOUS CONTRAINTES DE GESTION

Règles locales de gestion

Le pilotage de cellules de production inclut, dans certaines applications, une fonction "optimisation de la production". Cette fonction est traitée soit par des règles de sélection des pièces, soit par l'optimisation de critères de production (ex : engagement maximum de machines, minimisation des temps de transit).

La mise en oeuvre de nos décisions opérationnelles au sein de la fonction "PILOTE" correspondent à ce mode de travail.

Ordonnancement temps réel

Une autre méthode consiste à introduire une fonction ordonnancement en temps réel des moyens de production. Les logiciels SIPA (SIPA-87) ou ORDO

(BIES-88) envisagent cette méthode de travail qui constitue une aide à la prise de décision. Leur intérêt est dans la possibilité d'exécuter un traitement d'ordonnancement à partir de la situation instantanée de la production.

Intégration de la simulation

Le pilotage peut être assisté d'un moyen de simulation. Les auteurs proposent diverses méthodes d'utilisation de la simulation pour établir les contraintes de gestion à imposer au système de production.

La simulation peut servir au choix des règles de gestion à appliquer sur le système (HERI-91). L'exploitation de la trace des événements permet d'élaborer un ordonnancement de production (HART-87).

Nous devons faire intervenir la notion de modèle de production. En effet, un ordonnancement basé sur un modèle global peut ne pas être réalisable par suite de contraintes techniques (ex : indisponibilité des ressources annexes) qui n'auraient pas été prises en compte. Cet écart entre modèle et réalité peut être rattrapé par une prise en compte d'un suivi de production ; nous retrouvons le cas de figure du pilotage par suivi d'un ordonnancement différé.

Par ailleurs, il est possible de diminuer cet écart en diminuant le niveau d'agrégation du modèle. Cette seconde solution rejoint le pilotage en temps réel, où toutes les conditions techniques doivent être réalisées pour engager une action.

Cependant, quel que soit le modèle employé, il existe toujours un léger écart entre modèle et réalité dû à certains phénomènes non déterministes, tels que les pannes machines ou les produits à rebuter.

En conclusion, l'intérêt de la simulation est multiple :

- 1°) Orientation vers l'analyse de performances
- 2°) Par agrégation de modèle, possibilité de prise en compte de contraintes techniques plus fines.

Cependant, les dissensions entre modèle et réalité peuvent amener à des situations incorrectes.

Entre autres, (HART-87) utilise la simulation en bouclage associée à des méthodes de recherche d'optimum (ex : gradient) pour établir les critères d'engagement de lots sur un ensemble de postes de charges.

4.5 PILOTAGE ASSISTE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les nécessités d'intégrer l'intelligence artificielle au sein de la fonction "PILOTE" sont multiples. Citons deux exemples :

- 1°) (PIER-87) soulève la difficulté d'exprimer des règles de décision par des méthodes classiques. A partir d'une application industrielle en fonderie, il modélise le niveau décisionnel sous forme d'une base de règles. Cette base, mise en oeuvre à l'aide du système expert GOSSEYN, est appliquée et testée sur un modèle du système de fabrication exprimé en langage SLAM.
- 2°) Le choix entre plusieurs règles pour une traiter une décision est plus aisé lorsque nous introduisons un système expert. Les formalismes de méta-connaissances, l'inférence, la logique floue (DUBO-86) (HOLS-86) ainsi que les principes d'apprentissages (WU-88), constituent les outils les mieux adaptés à ces problèmes.

Nous présentons brièvement, ici, quelques méthodes mise en oeuvre en I.A. pour résoudre les problèmes de gestion des cellules.

L'intégration d'un système expert au sein d'un moyen de pilotage est envisagée pour modifier certains paramètres (ou leviers) en vue de conserver les objectifs de production, ou de réagir face à une situation particulière.

(NIED-88) présente une application développée dans le cadre du programme européen ESPRIT. DELFI-2, le système expert, décide, à partir d'un événement ou d'une situation donnée du système réel, d'évaluer et d'appliquer un nouveau planning de production. Ceci, en vue de conserver

les objectifs de production par optimisation d'un ensemble de critères d'évaluation des performances.

Dans cette application, le nouveau planning est établi par modification des règles de choix de passage des pièces sur les postes de travail. Une simulation, avant pilotage, permet de valider ce nouveau plan de production. Cette phase de régénération des données de production n'est activée que lors d'événements clefs. Finalement, pour limiter le champs d'investigation, le système élabore un ensemble d'hypothèses en fonction d'informations complémentaires fournies par l'utilisateur.

Le schéma suivant présente le principe de cette application

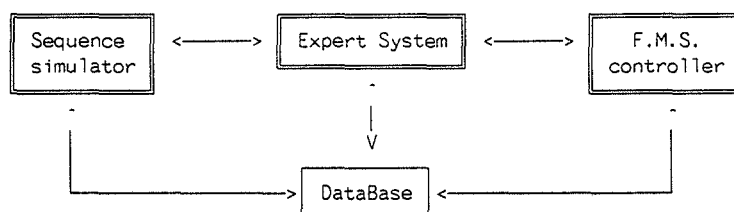


Figure 4.1: Schéma de principe l'application DELFI-2

(BESO-90) apporte une démarche similaire dans le cadre de l'application SAGASSE. La simulation est remplacée par une base de connaissances qui contient des groupes de relations (Règles de gestion - Performances de production), qu'il est souhaitable d'appliquer dans telle ou telle situation connue. Le système réel de production est simulé à l'aide d'un modèle RdPcT. Chaque conflit inhérent à la modélisation des RdPcT est exploité en tant que point de décision, à partir duquel le système expert (NEXPERT) est activé. A cet instant donc, NEXPERT sélectionne une ou plusieurs règles pour lever le conflit, tout en tentant de maintenir les performances de production dans une "pyramide d'évaluation" donnée. A cette pyramide, nous pouvons associer une fonction coût (ex : Coûts de stockage, d'exploitation, de livraison) ou toute autre critère d'évaluation de la production.

Cette seconde solution évite la phase d'évaluation des performances à l'aide d'une simulation réalisée en parallèle au système réel. Cependant, elle implique que le système réagisse de façon conforme face aux règles de gestion utilisées. Ce qui ne se vérifie pas dans chaque application. Le

problème est donc transposé vers la constitution de la base de connaissances.

(VOYI-87) propose de constituer une forme de mémoire artificielle pour résoudre ce problème. De même, par un système de commande hiérarchisée, (NURS-88) aborde les divers aspects de mise à jour de la base de règles du système RETICS. Dans ces deux cas, le système de pilotage intègre une fonction experte, apte à établir un bilan d'une situation donnée, et à modifier la base de connaissances, générant un système que nous pourrions qualifier d'"auto-adaptatif".

En fait, (WU -88) illustre bien la hiérarchisation de la conduite d'atelier à l'aide d'un système expert, selon le schéma MPECS (Multi-Pass Expert Control System). Trois niveaux successifs de décisions sont activés en fonction du problème et de la complexité des objectifs à traiter.

Le premier niveau W.R.M. (Working Rule Module) est une fonction classique qui fournit un ensemble de règles de gestion (sélection dans les files d'attente) pour régler les conflits de choix en production.

Le second niveau I.S.M. (Intelligent Scheduling Module) agit sur le W.R.M. en appliquant les lois de gestion associables au contexte de production en cours. Ce niveau est à rapprocher des travaux de (BESO-90) où une règle de gestion est appliquée en fonction de ses propriétés à corriger les performances observées.

A ce second niveau intervient donc, non seulement l'état du système de production à un instant donné, mais aussi ces performances au cours du temps.

Le troisième niveau L.M. (Learning Module) est en fait une sous-fonction évidente de l'I.S.M.. Il permet de reboucler le système d'évaluation des performances. En effet, comme nous l'avons signalé, chaque application industrielle à une façon propre de se comporter vis à vis de l'application de telle ou telle règle de gestion. Les résultats obtenus ne sont donc pas "universels". Il convient d'observer et de prendre en compte l'effet de chaque règle sur le système réellement piloté.

La figure suivante présente le principe de fonctionnement de ce système de décisions multi-niveaux.

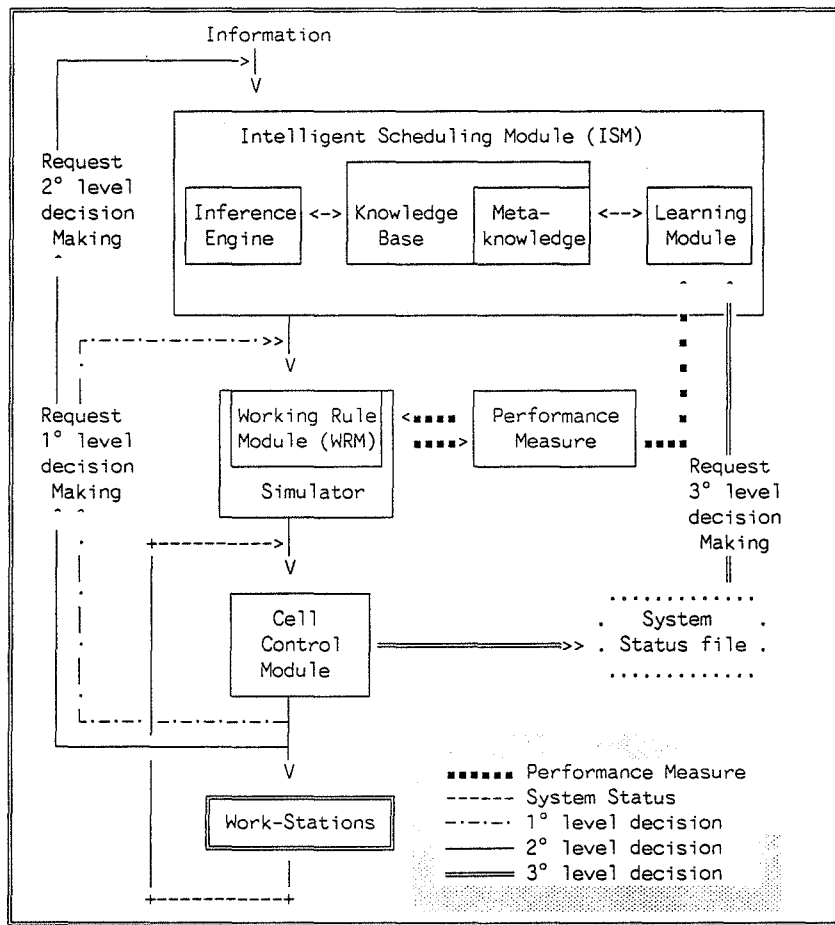


Figure 4.2: Schéma général de MPECS

En résumé, la caractéristique essentielle des moyens de pilotage assistés de systèmes experts, est leur capacité d'*auto-adaptation* face à une application réelle donnée. Le pilotage se personnalise au fur et à mesure des utilisations du site de production concerné.

4.6 CONCLUSION

Les politiques de pilotage sont diverses. La voie la plus prometteuse, actuellement, semble être celle de l'intégration de moyens experts (PIER-90). En effet, ces moyens permettent de traiter les décisions de type D1* voire D2* que nous avons défini au 1° chapitre.

L'organisation de notre travail, autour du schéma MPECS, peut se situer vers le 1° niveau de décision (WRM), puis, à l'aide des méthodes ACP, vers la mesure et l'analyse de performances en vue d'un cycle d'apprentissage.

Chapitre 5

CONCLUSION

Notre travail apporte une approche intégrée des cellules de production. Nous échappons au schéma classique (Machine+Produit) pour affiner le problème et prendre en compte d'autres ressources de production (système de montage, transport) ou le comportement face à une situation intégrant des phénomènes aléatoires tels les pannes.

Notre schéma d'analyse se décompose en trois niveaux :

- Physique
- Structure d'informations
- Décisions opérationnelles

L'étude de la typologie des systèmes de production localise chaque fonction (Transformation, transport, stockage, supervision, aide à la conduite et gestion). Elle nous a permis de mieux cibler le problème qui nous préoccupe : la gestion en temps réel de cellule de production, pour définir la fonction "PILOTE".

En ce qui concerne l'aspect pilotage, nous avons montré la tendance à la diminution de l'inter-dépendance des moyens mis en oeuvre. Chaque élément devient, non plus un *esclave*, mais un *acteur*. Ceci engendre la décentralisation et un allègement de la gestion en temps réel.

D'autre part, certaines typologies sont plus favorables à l'aspect multi-tâches d'un système de production. Par exemple, l'emploi d'un stockage commun, interposé entre les machines et les postes opérateur ou contrôle, ou la séparation des circuits pièces et outils.

Dans le cas d'une cellule mono-transport, l'ordonnancement de la production est ramené à celui des pièces sur les machines en fonction des

capacités des ressources annexes et des moyens de stockage. Dans le cas d'un transport libre, réside le problème de son allocation en fonction des charges et de l'implantation de la cellule.

Nous proposons et testons un ensemble de lois associées au niveau opérationnel. Cet ensemble est composé de règles existantes, mais aussi de fonctions nouvelles prenant en compte l'ensemble des ressources. Nous insistons, ainsi, sur les aspects anticipation, sur les règles de choix de pièces et sur la méthode d'allocation d'une mission au transport.

Les outils utilisés sont la simulation par événements discrets, et l'analyse en composantes principales. Les modèles physiques et de pilotage sont intégrés au logiciel de simulation SIMULFLEX. Nous avons complété cette application d'un niveau de décisions opérationnelles. Une programmation structurée était considérée suffisante, compte tenu de la logique de décision abordée. En effet, il semble indispensable, avant d'employer des outils relevant de l'intelligence artificielle, d'en étudier l'opportunité par rapport au problème à traiter.

L'étude d'un cas réel de fabrication a mis en évidence le rôle de la fonction transport. Nous avons recherché une composition, de lois de gestion, qui possédait un caractère polyvalent vis-à-vis de l'ensemble de nos critères de performances.

Sur cette étude, nous avons fait apparaître une composition stable et performante. Elle intègre un choix simple des pièces (tel FIFO ou Priorité à la pièce la plus ancienne), une anticipation sur les actions qualifiée de Juste à Temps et, finalement, une règle d'allocation du transport qui minimise l'attente globale de cette ressource. Cependant, nous émettons une réserve quant aux règles de choix des pièces. En effet, d'un essai à l'autre, ce type de loi a tendance à dégrader les performances. C'est ce trait de caractère que nous avons qualifié de voyageur.

En réunissant les éléments de notre exposé, nous proposons une démarche méthodologique pour aborder les problèmes de conception puis de pilotage des cellules flexibles de production. Nous mettons ainsi, en évidence, la nécessité d'employer des techniques de l'Intelligence Artificielle (I.A.) pour aborder les niveaux de décision supérieurs, et

constituer des moyens de pilotage complet, intégrant le comportement du système de fabrication.

Annexe A

RAPPELS DE GESTION DE PRODUCTION

Cette annexe décrit les principes connus en gestion de production. Nous rappelons les définitions de base, ainsi que les concepts relatifs aux diverses méthodes de gestion de production diffusées dans l'industrie.

A.1 Modèles de production

Au niveau de l'ordonnancement de production, deux modèles d'ateliers ont été conçus ; Le FLOW SHOP et le JOB SHOP.

FLOW SHOP : Production où toutes les pièces passent successivement sur toutes les machines du système de production, sans feedback.

ex : Pour 2 machines A et B

Les pièces sont usinées sur la machine A puis sur la machine B

Pureté d'un FLOW SHOP : Un FLOW SHOP est dit pur si certaines pièces ne passent pas sur toutes les machines.

ex : Pour 2 machines A et B

Les pièces sont usinées soient :

- Sur A puis sur B
- Sur A uniquement
- Sur B uniquement

JOB SHOP : Production où les pièces circulent de façon quelconque sur le système de production.

ex : Pour 2 machines A et B

Les pièces sont usinées soient :

- Sur A puis sur B
- Sur B puis sur A

- Sur A uniquement
- Sur B uniquement
- Sur A puis sur B puis, de nouveau sur A
- ...

A.2 Règle de sélection de pièces dans une file d'attente

Une règle de sélection consiste à choisir entre plusieurs pièces suivant une loi déterminée. Par exemple, nous sélectionnons une pièce selon la loi FIFO, la première arrivée est la première servie, ou, selon la loi SPT, la pièce dont le temps opératoire suivant est le plus court est la première servie (DUMA-74) (KAZA-85). Ces règles engendrent un ensemble de décisions d'affectation.

Règle de gestion

Une règle de gestion est une logique qui définit la façon dont doit être géré le système de production. Cette logique vise l'optimisation de certains critères (WU -88) ou la réalisation de certaines contraintes de production (PIER-87).

Par exemple, si nous souhaitons satisfaire la demande client, alors nous mettons en oeuvre des règles de sélection qui favorisent les pièces en retard (ex : DDATE, SLACK).

Contrainte de gestion

Une contrainte de gestion est l'effet de l'application des règles de sélection et/ou des règles de gestion, sur le système de production.

Par exemple, une contrainte de gestion impose un ordre de passage des pièces sur un poste de charge. De même, elle entraîne la constitution ou l'éclatement de lots de production.

A.3 Méthodes de gestion de production

La GPAO classiquement, selon le modèle MRP, contient les outils suivants :

Gestion des commandes clients
 Prévisions commerciales de ventes
 Plan directeur de production
 Gestion des données Techniques
 Planification des besoins
 Gestion des stocks
 Planification des charges
 Ordonnancement Lancement
 Suivi de production
 Calculs des prix de revient

La figure suivante illustre l'organisation de ces outils :

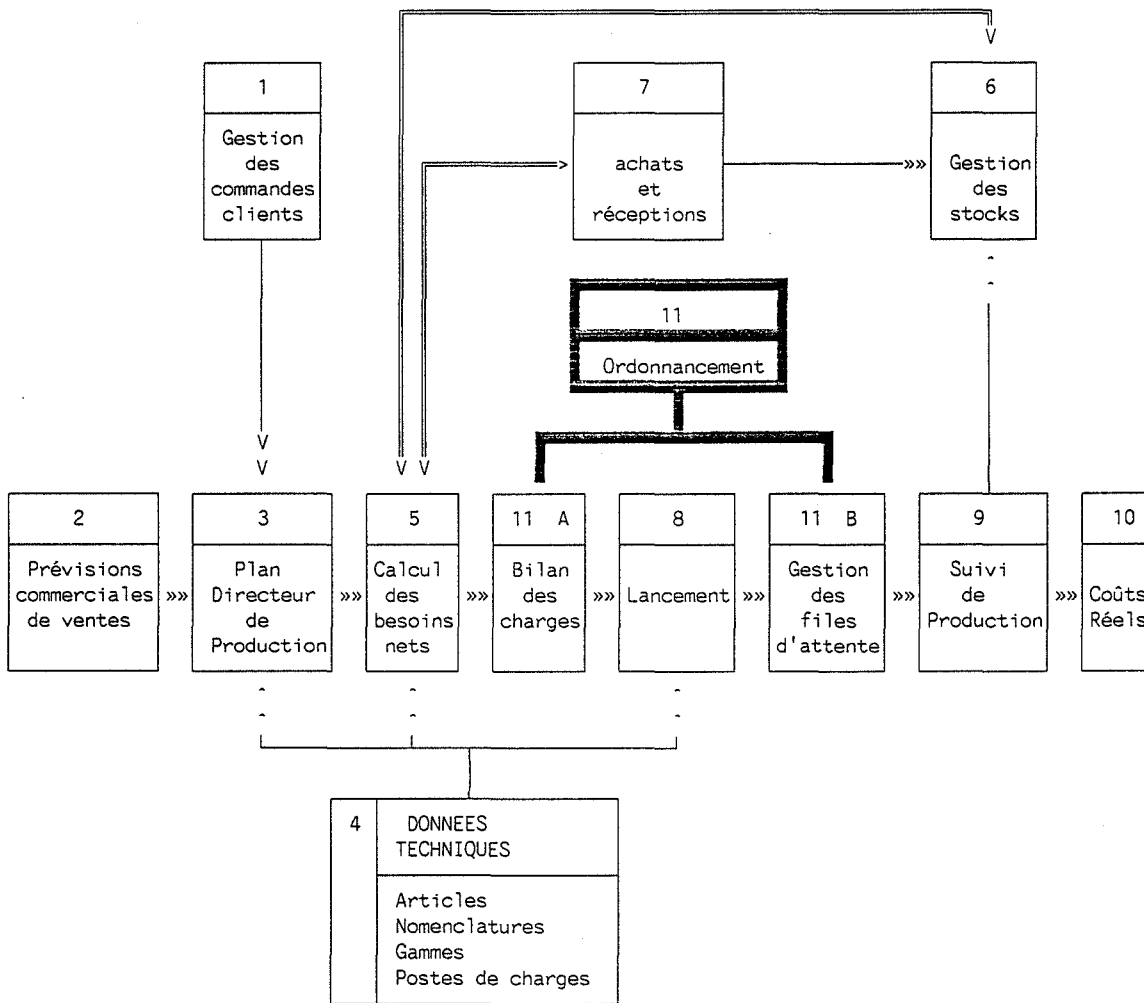


Figure A.1: Gestion de production Type MRP

Les techniques de GPAO sont différentes, elles sont essentiellement adaptées au type de production à réaliser.

Dans certains cas particuliers, des solutions mixtes sont exploitées, combinant les techniques de l'une pour le court terme (KANBAN, OPT) avec les techniques de l'autre pour le long terme (MRP). Rappelons les principaux concepts relatifs à chacune des méthodes.

MRP : d'origine américaine, fondée sur une planification prévisionnelle des besoins aux divers niveaux de nomenclatures. Elle privilégie la gestion des articles dans le temps. Elle suppose des produits variés, des nomenclatures à plusieurs niveaux, un horizon de prévision suffisant.

MRP I : Material Requirements Planning 1960

Orienté vers la planification des besoins

MRP II : Manufacturing Resource Planning

Apporte deux nouveaux concepts :

- * Prise en compte des capacités de production
(Modèle de gestion à capacité finie)

- * Pilotage des flux matières et en-cours en temps et en quantités

KANBAN : Origine japonaise, fondée sur une transmission en cascade, à partir de l'aval (demande effective, plutôt que prévisionnelle) des ordres de fabrication, par lots très petits et sans stock. Elle suppose un petit nombre de produits (variantes possibles), une stabilité de la demande (fluctuation à court terme sans amplitude).

OPT : Origine israélienne, fondée sur une planification au plus serrée des goulots d'étranglement (anti-flux) de l'appareil de production.

MULTI-PERT (Ou Multi-projet) : Permet de gérer, de manière concomitante, plusieurs projets faisant appel aux mêmes ressources. Elles supposent des produits complexes, des cycles de production longs, des opérations répétitives.

OPT : Optimized Production Technology

PERT : Program Evaluation Research Task (1958 US NAVY Prg POLARIS)

Annexe B

REGLES LOCALES DE GESTION

Ci-dessous, nous rappelons quelques règles (DUMA-72) permettant de constituer les logiques de décision LA0*.

Les variables : notation

Remarque : La notation utilisée ici n'est valable que pour l'énoncé concernant les règles de gestion locale. On ne la confond pas avec celle utilisée pour la gestion du système de transport.

Variables exogènes

* date d'arrivée du produit i	R_i
* date de livraison prévue du produit i	D_i
* délai prévu	$A_i = D_i - R_i$
* nombre d'opérations sur le produit i	N_i
* temps de fabrication du produit i à la j ^o opération	P_{ij}
* temps total de fabrication du produit i Somme des P_{ij} selon j variant de 1 à N_i	P_i
* temps de fabrication restant sur le produit i à la j ^o opération. Q_{ij} est la somme des P_{ik} selon k variant de j à N_i	Q_{ij}
* marge statique du produit i	$M_i = D_i - P_i$
* valeur initiale de la marge dynamique	$K_i^0 = A_i - P_i$

Variables endogènes

* date de calcul	t
* date d'achèvement réel du produit i	C_i
* durée de séjour du produit i	$F_i = C_i - R_i$
* décalage du produit i	$L_i = C_i - D_i$

* avance du produit i

$$E_i = \text{Max}(0, -L_i)$$

* retard du produit i

$$T_i = \text{Max}(L_i, 0)$$

* marge dynamique du produit i

$$K_i = M_i - t$$

Variables d'analyse

Pour un produit sans arborescence

* attente du produit i à la j^o opération

$$W_{ij}$$

Désignation	Description	Calcul
A) Les règles de sélection d'une pièce		
Règles de choix ne dépendant pas de la date de livraison		
FIFO/FCFS	First In First Out	
LIFO/LCFS	Last In First Out	
FASFS	Date d'arrivée sur l'atelier	(R_i)
SPT	Shortest Processing Time (Shortest Imminent Processing Time)	(P_i) (P_{ij})
	Sélectionne la tâche dont le temps opératoire est le plus faible.	
LPT	Longest Processing Time (longest Imminent Processing Time)	(P_i) (P_{ij})
	Sélectionne la tâche dont le temps opératoire est le plus élevé	
SPT/OPN	Shortest Processing Time per operation	(P_i/N_i-j+1)
SPT/WKR	Sélectionne la tâche dont le rapport du prochain temps opératoire au travail résiduel est minimal	
SPT/TWORK	Sélectionne la tâche ayant le plus faible rapport du prochain temps opératoire au travail total.	
MWKR	Most Work Remaining	$1/Q_{ij}$
	Sélectionne la tâche dont la somme des temps opératoire restant est la plus longue	
LWKR	Least Work Remaining	Q_{ij}
	Sélectionne la tâche dont la somme des temps opératoires restant est la plus courte	
TWORK	Total Work	P_i
FOPNR	Fewest Operations Remaining	N_i-j
	Sélectionne la tâche dont le nombre d'opérations restant est le plus faible	
MOPNR	Most Operations Remaining	$j-N_i$
	Sélectionne la tâche dont le nombre d'opérations restant est le plus élevé	
WINQ	Work In Next Queue	

Désignation	Description	Calcul
	Somme des temps dans la file d'attente supportant l'opération j+1	
XWINQ	Expected Work In Next Queue --> Idem à WINQ, mais à l'instant où le produit i rentre sur le poste j+1	
<u>Nota</u> : WINQ & XWINQ peuvent s'étendre aux chemins que doivent prendre les produits jusqu'à leur sortie de la fonction production		
RANDOM	Choix aléatoire	
PRIORITY	Choix en fonction de priorité commerciale	
SETUP	Maintien des outils sur la machine	
COST	coût du lot	
MWKR/OPN	$(1/Q_{ij})/P_{ij}$	

Règles de choix dépendant de la date de livraison

DDATE	Due Date	D_i
EDD	Earliest Due Date Sélectionne la tâche dont la date au plus tard est la plus proche	$D_i - t$
OPNDD	Operation Due Date : Le temps alloué au produit est divisé entre les opérations, et chaque opération reçoit une date de livraison qui définit la priorité correspondante.	
SLACK	Selon les auteurs :	$M_i = D_i - Q_{ij}$
ou	$K_i = M_i - t$	
SLACK/OPN	Slack divisé par le nombre d'opérations restantes $K_i / (N_i - j + 1)$	
RSPT1	Rapport entre SLACK et SPT. Sélectionne la tâche au rapport minimal	
COVER_T	Pièce dont le coût du retard est maximum (nécessite une évaluation du retard)	

B) Sélection d'une destination pour une pièce

WINQ	Work In Next Queue Sélectionne la destination dont la file d'attente est minimum (en durée)
XWINQ	Sélectionne la destination dont la somme des files d'attente supportant les n-j opérations suivantes est minimum

Annexe C

DESCRIPTION TECHNIQUE LOGICIEL SIMULFLEX

LOGICIEL DE SIMULATION D'ATELIER : SIMULFLEX V 3.0

Société R A M S E S
Z.I. La Fléchette Dargoire
42800 RIVE DE GIER
Tél. 77 75 15 59

Résumé : Ce document présente brièvement le logiciel SIMULFLEX dans sa nouvelle version (3.0) disponible sur IBM-PC ou compatible, muni d'une carte couleur type CGA. Ce produit est un logiciel de simulation de systèmes à événements discrets dédié aux problèmes des cellules de fabrication flexible. Il permet de concevoir un moyen de fabrication en termes de *dimensions*, *produits* et *gestion*.

C.1 Introduction

L'industriel est amené quotidiennement à se poser deux questions essentielles :

- * Comment dimensionner et intégrer un nouvel équipement de production ?
- * Comment gérer au mieux une production flexible, représentée par un carnet de commande variant de façon mensuelle, hebdomadaire voir quotidienne ?

Les sociétés de services en informatique industrielle, telles que RAMSES, et les constructeurs de biens d'équipement tendent de plus en plus à répondre à ces questions posées par leurs clients. Elles utilisent des outils de simulations qui sont, soit des langages de simulations tels que SLAM, QNAP 2, soit des logiciels spécifiques tels que SIMULFLEX.

SIMULFLEX est un logiciel de simulation de systèmes de production développé à partir de l'expérience professionnelle acquise par la société RAMSES.

SIMULFLEX, dont la logique de changement d'état est basée sur une approche de type processus, est, de par sa nature un logiciel dédié à des problèmes liés aux cellules de fabrication flexibles.

C.2 Principe de fonctionnement

SIMULFLEX s'articule autour de deux modules principaux ; la création de données et la simulation.

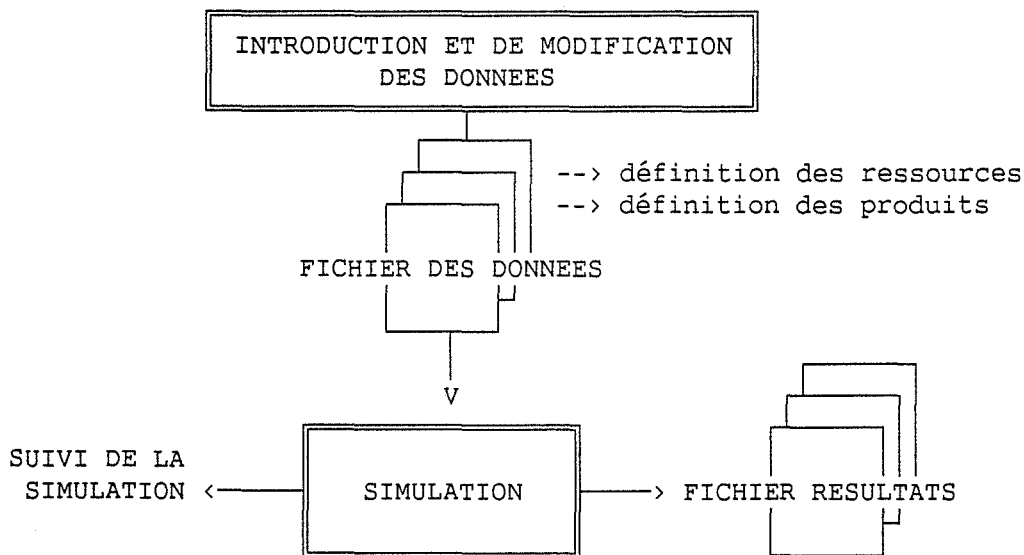


Figure C.1: SIMULFLEX : principe général

Un module d'introduction des données permet de décrire l'équipement que nous souhaitons simuler ainsi que le plan de fabrication qui lui est associé. Ces données vont alimenter des fichiers utilisés lors de la simulation.

Le module de simulation permet d'étudier le fonctionnement de cet équipement avec le plan de fabrication désiré. Une visualisation des performances du système simulé, en cours de simulation, ou à l'aide du fichier résultats, permet d'observer le comportement du système de production.

La convivialité et l'interactivité avec l'utilisateur ont été développées indépendamment du module de simulation. Elle font appel à une présentation sous forme de menus et de pages de symboles graphiques permettant de suivre aisément le déroulement de la simulation, et permettent d'éviter toute tâche de programmation.

C.3 Fonctionnalités de SIMULFLEX

Les équipements de production

SIMULFLEX permet de prendre en compte un certain nombre d'équipements de production présentées sur la figure suivante :

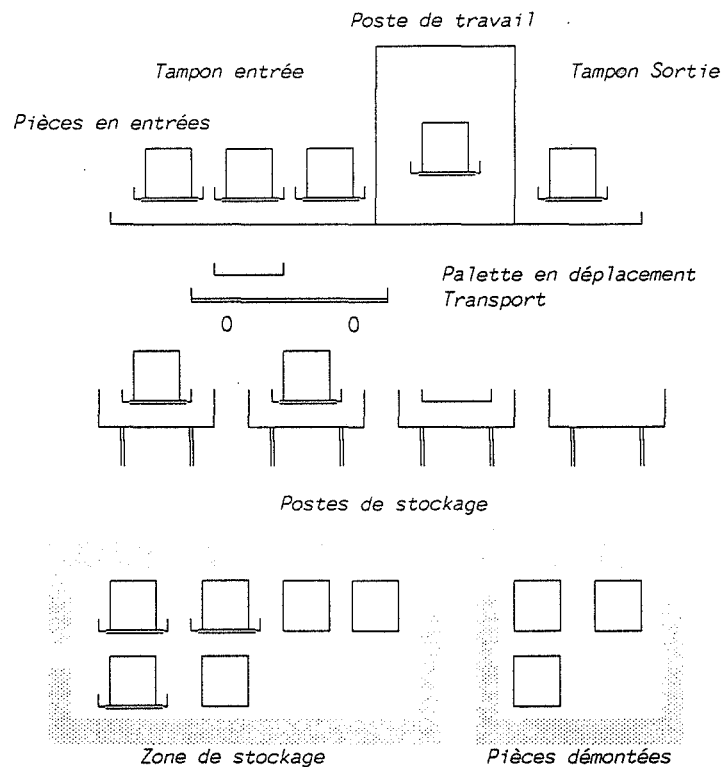


Figure C.2: SIMULFLEX : modèle de système de production

La définition de ces moyens est présentée ci-dessous :

- * *Postes de travail* : lieux où une pièce doit rester un temps donné, pour subir une opération. cette pièce peut être accompagnée de sa palette (bridage, outillage).
- * *Tampons entrée/sortie* : moyens de stockage aux abords des machines.
- * *Postes de stockage* : appelés aussi postes fixes, ce sont des moyens de stockages, partagés entre plusieurs machines, et sur lesquels il est possible de poser soit une pièce avec une palette, soit une palette seule.
- * *Zones de stockage* : lieux représentant des actions qui se produisent simultanément et indépendamment sur un nombre donné de pièces ; par exemple des opérations de refroidissement de pièces, de sous-traitance, de contrôle non destructif ...
- * *Zone de pièces démontées* : lieux où les pièces sont en attente d'une palette d'un nouveau type.

* *Les palettes* : moyen support des pièces au sein du système de fabrication. La figure suivante présente un ensemble "palette+bridage" sur lequel est montée une pièce.

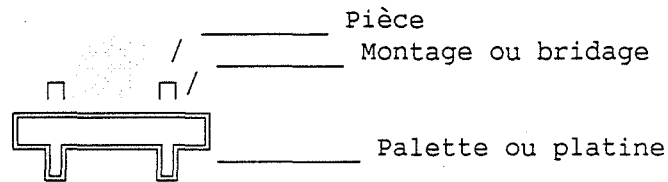


Figure C.3: Schéma de principe interfaces machines/produits

L'ensemble "palette+bridage" est désigné sous le terme palette. Les assemblages différents constituent des types de palette.

Une *option palette* permet d'indiquer le mode de stockage des palettes vides. Deux possibilités existent, soit celles-ci sont stationnées dans des stocks de palettes en dehors de l'atelier, soit elles restent en place sur les postes de stockage.

* *Ressource de transport* : moyen permettant de desservir les postes de travail (avec ou sans postes tampons) et les postes de stockage. Elle peut représenter un robot, un système de portique ou une navette. Différents paramètres la définissent :

- Nombre de préhenseurs (1 ou 2)
- Temps de déplacements (vitesse, accélération...)
- Durée d'un cycle de chargement ou de déchargement

* *Les transferts directs* : tout transfert de pièce ou de palette n'utilisant pas la ressource de transport est réalisé de façon immédiate.

* *Les périodes* : il est possible de décrire deux périodes de fonctionnement. Ces périodes sont appelées "période normale" et "période de veille". Elles introduisent des notions de fonctionnement du type 2*8 et 3*8 ou autre, où l'atelier peut être dans un mode dégradé, i.e. certaines machines ne fonctionnant pas durant la période de veille.

La figure ci-dessous présente le principe des périodes de fonctionnement :

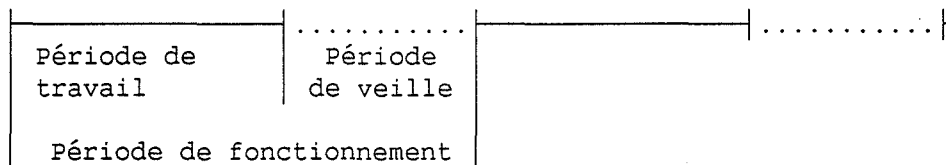


Figure C.4: Notion de période de fonctionnement

Chacun de ces éléments peut être dimensionné au gré de l'utilisateur (ex : nombre d'emplacements disponibles sur une zone de stockage, nombre de palettes pour un type donné).

Remarque : Quelques éléments des systèmes de productions peuvent s'intégrer au modèle générique de SIMULFLEX. Ceci se fait par analogie de comportement. Par exemple :

- * *Les postes de manutention* : un poste de travail peut être utilisé pour représenter un poste de manutention.
- * *Le convoyage* : avec certaines hypothèses la notion de zone de stockage s'étend à celle de convoyeur.

Les règles de gestion

SIMULFLEX, dans sa nouvelle version, met à la disposition des utilisateurs un ensemble de dix règles de gestion. Ces règles peuvent être appliquées sur les moyens de stockages (postes tampons, poste de stockage, zones de stockage, pièces démontées), ainsi que sur les pièces en lancement de production. A chaque ressource de stockage une règle différente est applicable.

Table C.1: Règles de gestion utilisables par SIMULFLEX

Désignation	Principe de priorité
Introduction	Pièce la plus ancienne dans la cellule
Priority	Priorité introduite par l'utilisateur
FIFO	Premier Entré / Premier Sorti (File d'attente)
LIFO	Premier Entré / Dernier Sorti (Pile)
SPT	Pièce dont le Temps d'usinage est minimum
LPT	Pièce dont le Temps d'usinage est maximum
Setup Time	Pièce identique minimisant les temps de réglages
Ddate	Date de livraison souhaitée par l'utilisateur
Slack	marge brute
Slack/OPN	marge pondérée

D'autre part, différentes politiques de gestion du moyen de transport sont disponibles (ex : modèle par classe de déplacement, sélection de trajet minimisant un critère donné). L'anticipation des déplacements peut, par ailleurs, être testée (choix possible du temps d'anticipation).

Pannes et réparations

Deux modes de générations de pannes sur les postes de travail sont disponibles. Soit l'utilisateur agit directement sur la ressource pour étudier, de façon interactive, l'effet d'une mise en panne ou d'une réparation. Soit, l'application de temps moyens de mise en panne (MTBF) et de réparation (MTTR) traite automatiquement le problème.

Une dizaine de lois de probabilités sont utilisées pour établir ces temps moyens :

Table C.2: Lois de mise en panne et de réparation

Poisson
Exponentielle
Uniforme
Triangulaire
Normale
Log normale
Weibull
Gamma
Beta
Erlang

Les produits et le plan de fabrication

Le rôle d'une simulation étant de tester un système de production avec une gamme de produits donnés, SIMULFLEX permet, bien évidemment, de composer un plan de fabrication avec des produits divers qui possèdent des circuits différents sur le système de production.

Ainsi, les produits, entités indivisibles et "inassemblables", sont décrits par leur gamme et un plan de fabrication.

* *Les gammes de fabrication* : elles indiquent la séquence d'opérations que subit chaque pièce de chaque type. Pour une opération nous indiquons les postes susceptibles de réaliser l'action, la durée de l'action, et la palette utilisée.

Des actions spécifiques peuvent s'insérer dans une gamme :

- * *séquence de démontage* : opérations successives décrivant un changement de palette pour le type de pièce concerné.
- * *Action combinée* : sur un poste de travail sans tampon, la ressource de transport reste en attente le temps de l'opération (ex : lavage de pièce).
- * *Zones de stockage* : le passage sur une zone de stockage doit être spécifié. Il indique la zone à employer, le temps minimum

de stationnement obligé et le type de palette associé (si besoin).

* *Le plan de fabrication* : il indique, pour chaque type de pièce, les quantités à fabriquer selon le modèle ci-dessous :

Pour un type de pièce

- Nombre de séries

Pour chaque série

- Nombre de pièces dans la série
- Date d'approvisionnement
- délai de fabrication souhaité
- priorité "utilisateur"

Lorsqu'une série de pièces est approvisionnée, elle n'est introduite réellement sur les moyens de production qu'en fonction de la disponibilité de ces derniers.

Deux options sont associées au plan de fabrication :

* *Option série* : si cette option est activée, alors chaque série est intégralement insérée sur le moyen de fabrication, comme un lot complet. Sinon, la série est éclatée pièce par pièce.

* *Option rythmée* : si cette option est activée, chaque série d'un même type de pièce est introduite avec un rythme spécifique par rapport à la précédente. Sinon, chacune d'elle peut se personnaliser (paramètres de la série différents).

Quelques fonctions complémentaires

Quelques fonctions complémentaires permettent d'agir sur l'exploitation du module de simulation :

* *Mode "trace"* : ce mode force le logiciel à générer un fichier "trace", contenant chaque événement simulé (nature et date d'exécution), classé par ordre chronologique.

* *Mode "batch"* : ce mode permet d'exécuter des simulations sans manipulation de l'utilisateur. Ceci est utile pour exécuter des simulations successives.

* *Début et fin de prise de résultats* : des dates de début et de fin de prise de résultats permettent de tronquer les périodes de mise en charge ou d'arrêt du système simulé.

* *Echantillonnage* : une période d'échantillonnage permet de prélever certaines observations, à périodes régulières, pour étudier les divers régimes transitoires. Une sauvegarde de ces observations est réalisée dans un fichier de travail.

C.4 L'introduction des données

L'aspect "dédié" de SIMULFLEX est essentiel. Nous l'exposons ici, par une présentation de quelques fonctions du module d'introduction des données.

Le menu d'utilisation de ce module est présenté ci-dessous. Il donne accès aux fonctions de saisies de données. Ces fonctions permettent de décrire le système de production concerné et le plan de fabrication qui l'accompagne.

Fichier de données : ATELIER

Création/Modification

1 - Informations générales 2 - définition des postes de travail 3 - Informations relatives aux transports 4 - Distances des postes de stockage 5 - Affectation des postes de stockage 6 - Zones de stockages 7 - Informations palettes 8 - Arrêts durant la période de travail 9 - Gammes de fabrication 10 - Programmes de fabrication 11 - Paramètres de simulation
VOTRE CHOIX :

F1 ----> Aide	Esc -> Sortie Immédiate	F10 -> Sauvegarde	F5 -> Edition
---------------	-------------------------	-------------------	---------------

SIMULFLEX V3.0

@ RAMSES 1990

Figure C.5: Menu de création des données

Les figures suivantes présentent deux exemples de ces fonctions de saisie. La première est une page de "définition des postes de travail".

Définition des postes de travail			
Poste N°	1	Désignation : Tour n° 1	
Arrêt en veille :	N	Desservi par la navette : 0	
Temps de réglage :	0.0	Position :	1.25 m
Réglage masquable :	0		
Zone tampon entrée		Zone tampon sortie	
Dimension :	0	Dimension :	0
Règle de gestion : Introduction		Règle de gestion : Introduction	
Mise en panne		Mise en réparation	
Loi : triangulaire		Loi : uniforme	
minimum :	3.00	minimum :	0.02
maximum :	6.00	maximum :	0.08
moyenne :	4.50		

SIMULFLEX V3.0

@ RAMSES 1990

Figure C.6: Page de définition des postes de travail

La seconde présente la saisie d'un "programme de fabrication rythmé". La saisie est établie, judicieusement, en fonction des ressources à définir ou des produits à réaliser.

Programme de Fabrication Rythmé

N ° Pce	Désignation	Nbre de Série	Taille Séries	date intro 1° série	Rythme d'intro.	Délai Souhaité	Prio rité
1	Pièce réf 32-ZS	9	5	0.900	24.000	125.000	2
2	Pièce réf 32-ZX	4	5	10.000	24.000	132.000	2
3	Pièce réf 32-ZK	10	5	0.900	30.000	6.000	1
4	Pièce réf 33-ZZ	3	5	26.000	30.000	11.000	2
5	Pièce réf RD-21	1	5	100.000	24.000	127.000	2
6	partie principale	4	5	206.000	30.000	7.000	2
7	Spéciale XX-21	1	7	122.000	0.000	118.000	1
8	Spéciale XX-22	1	7	314.000	0.000	10.000	2
9	Spéciale XX-23	1	5	146.000	0.000	120.000	2

SIMULFLEX V3.0

@ RAMSES 1990

Figure C.7: Page de saisie du programme de fabrication

Ce module intègre une fonction d'aide ainsi qu'une validation automatique des données saisies par l'utilisateur.

C.5 La simulation

La partie simulation de SIMULFLEX exploite le fichier de données pour définir les paramètres d'un modèle d'atelier pré-programmé et le simuler.

La simulation, de type "événements discrets", fait évoluer chaque processus lié à chaque type de ressource. Par exemple, pour une machine sans tampon, le processus complet est constitué d'une séquence (chargement-transformation-attente de la ressource de transport puis évacuation). Cette séquence est complétée de cycles d'arrêts ou de mise en panne, en fonction de la définition faite par l'utilisateur.

L'utilisateur peut suivre le déroulement de la simulation ou exploiter uniquement les fichiers résultats.

Suivi de la simulation

Lors du déroulement de la simulation, SIMULFLEX présente des pages de suivi. Elles visualisent les informations instantanées (ex : état machine libre/occupé/en panne) ou statistiques (ex : taux d'occupation, nombre de pièces exécutées) du déroulement des divers processus simulés.

Nous exposons, ci-dessous, une page de représentation semi-graphique de l'état d'un atelier en cours de simulation.

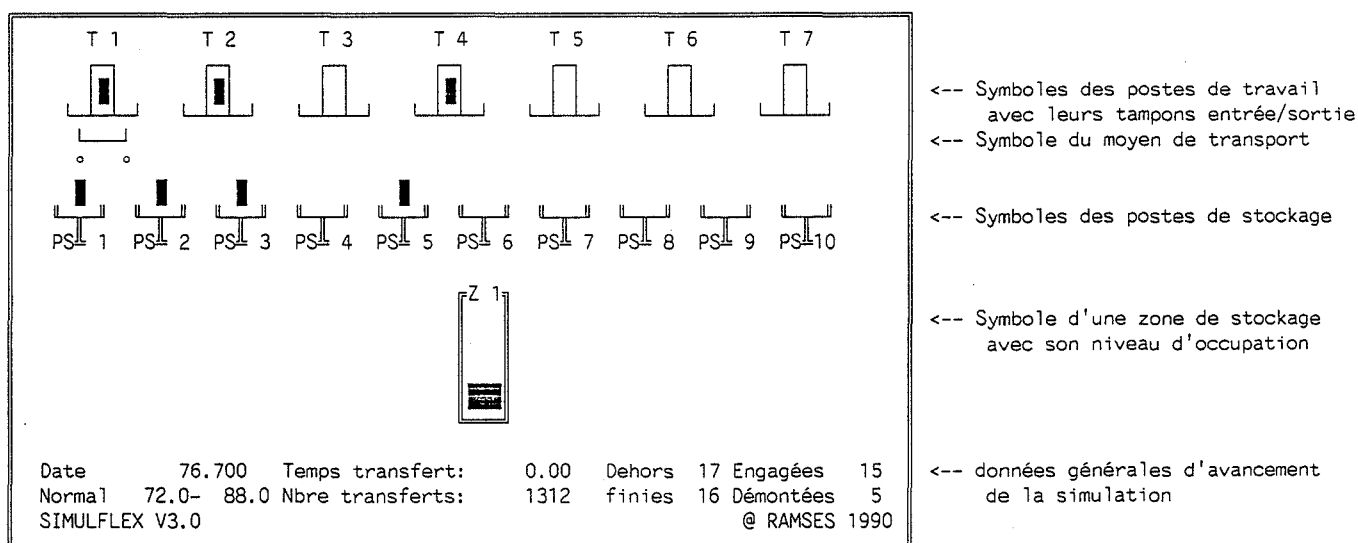


Figure C.8: Exemple de suivi interactif de la simulation

L'utilisateur dispose des modes suivants :

- Représentation symbolique
- Représentation numérique
- Zoom sur un poste de travail
- Taux d'occupation des postes de travail et du moyen de transport (depuis le début de la prise des résultats ou pour chaque période de fonctionnement)
- Etat d'avancement du programme de production
- Mode de traitement "Batch"

Des pages d'aide ajoutent un plus à la compréhension des divers symboles employés.

Les fichiers

Lors de la simulation ou en fin de traitement, ce module génère les fichiers suivants :

- * un fichier résultats directement exploitable par l'utilisateur.
Ce fichier est présenté brièvement ci-dessous.
- * un fichier de sauvegarde des dates effectives d'introduction et d'évacuation des pièces sur l'atelier.
- * un fichier de statistiques sur l'exploitation des postes de travail (Taux d'occupation, de panne, de blocage pour chaque période d'échantillon).
- * un fichier "trace" contenant chaque événement simulé avec sa date d'exécution.

L'utilisateur exploite ces fichiers pour analyser le système de production conçu précédemment.

Conditions de fin de simulation

La fin de simulation est conditionnée par différentes situations. Nous les décrivons ci-dessous :

- * Plan de fabrication entièrement réalisé
- * Situation dite inextricable ; c'est à dire quand le système se retrouve saturé, ou qu'aucune décision ne peut être prise (conflit non traitable).
- * Arrêt à une date choisie, au préalable, par l'utilisateur.
- * Arrêt au cours de la simulation par l'utilisateur.

C.6 Les résultats

Le suivi de la simulation fournit des résultats intermédiaires (ex : affichage de l'état du système à chaque instant, des histogrammes d'occupation des postes de travail). Il est également possible d'analyser les choix de dimensionnement du système simulé, l'ordonnancement choisi ou les effets des règles de gestion mise en oeuvre.

Un fichier "*résultats*" restitue les informations nécessaires à cette évaluation. Il permet, entre autres, de détecter d'éventuels points délicats de fonctionnement.

Entre autres, ce fichier indique :

* Les utilisations observées des équipements :

Par exemple les temps ou les taux d'occupation, ou le nombre d'utilisations pour chaque type de ressource (moyen de transport, moyens de stockage, palettes).

Table C.3: Exemple de résultats sur les postes de travail

PTR N°	Taux D'engt.	Taux d'attente	Taux de panne	Taux d'arrêt	Taux de réglage	Taux de blocage
1	62.27 %	31.77 %	0.95 %	0.00 %	0.86 %	4.14 %
2	61.89 %	33.82 %	1.01 %	0.00 %	0.82 %	2.47 %
3	0.29 %	97.70 %	0.00 %	0.00 %	0.42 %	1.59 %
4	71.24 %	27.17 %	1.01 %	0.00 %	0.42 %	0.16 %
5	28.07 %	33.59 %	0.00 %	33.01 %	1.67 %	3.66 %
6	19.64 %	42.56 %	0.00 %	33.01 %	1.12 %	3.67 %
7	10.14 %	51.51 %	0.00 %	33.01 %	0.61 %	4.73 %

Date de fin d'engagement de l'atelier : 581.648

Date d'initialisation des résultats : 0.000

Temps total perdu (Non fonctionnement total de l'atelier) 62.043

* La réalisation du plan de fabrication :

Temps de cycle (Durées de vie ou délais de fabrication) de chaque type de pièce, moyenne, minimum et maximum. Dates d'entrée et de sortie réelles de chaque pièce. Estimation des retards et des avances.

Table C.4: Exemple de résultats pièces réalisées

n°	désignation	exécutées	en-cours	temps de passage sur l'atelier		
				MOYEN	MINIMUM	MAXIMUM
1	Pièce réf 32-ZS	45	9.078	116.375	92.199	140.185
2	Pièce réf 32-ZX	20	5.570	162.696	124.081	201.020
3	Pièce réf 32-ZK	50	1.692	19.150	5.829	34.890
4	Pièce réf 33-ZZ	15	0.867	34.588	12.920	74.954
5	Pièce réf RD-21	5	1.073	125.485	105.746	140.844
6	partie principa	20	1.238	37.730	11.346	82.232
7	Spéciale XX-21	7	1.747	146.154	100.825	161.751
8	Spéciale XX-22	7	0.413	34.303	25.632	47.618
9	Spéciale XX-23	5	0.977	116.026	106.200	121.354
10	Pièce réf VV-CC	7	1.224	103.502	95.479	113.469
11	Pièce réf XD-CD	4	0.110	14.200	9.963	18.807
12	Pièce réf 3121	7	1.004	83.220	77.280	88.826
13	Pièce réf 0007	4	0.165	23.998	23.934	24.075

Table C.5: Exemple de résultats pièces réalisées (Suite)

n°	désignation	Nbre de retard	Retard Moyen	Retard maximum	Ecart Type	nombre d'avance	Avance Moyenne	Ecart Type
1	Pièce réf 32-ZS	12	5.71	16.29	3.50	33	116.76	82.82
2	Pièce réf 32-ZX	0	0.00	0.00	0.00	20	139.01	57.39
3	Pièce réf 32-ZK	1	0.11	0.11	0.00	49	45.93	25.55
4	Pièce réf 33-ZZ	0	0.00	0.00	0.00	15	32.00	24.41
5	Pièce réf RD-21	0	0.00	0.00	0.00	5	110.64	26.62
6	partie principa	0	0.00	0.00	0.00	20	115.59	59.61
7	Spéciale XX-21	0	0.00	0.00	0.00	7	169.23	47.14
8	Spéciale XX-22	0	0.00	0.00	0.00	7	187.79	15.87
9	Spéciale XX-23	0	0.00	0.00	0.00	5	188.56	10.54
10	Pièce réf VV-CC	0	0.00	0.00	0.00	7	199.11	23.09
11	Pièce réf XD-CD	0	0.00	0.00	0.00	4	138.03	5.93
12	Pièce réf 3121	0	0.00	0.00	0.00	7	236.60	9.86
13	Pièce réf 0007	0	0.00	0.00	0.00	4	122.69	2.25

Retard moyen observé : 5.28
Retard maximum observé : 16.29
Ecart type des retards : 3.68
Avance moyenne observée : 106.83
Ecart type des avances : 74.73

L'utilisateur peut, à sa guise, composer le fichier "résultats" de son choix, et faire ressortir les informations qui lui paraissent essentielles.

BIBLIOGRAPHIE

- (BEL -85) BEL F. DUBOIS D.
Modélisation et simulation de systèmes automatisés de production
APII 1985 , Vol 19, pp3-43
- (BENE-85) BENETTO R.
Les ateliers flexibles de production
HERMES PUBLISHING 1985
- (BESO-90) BESOMBES B.
Un système d'aide à la conduite d'atelier flexible basé réseaux
de Petri Colorés
Thèse Université Lyon I. Novembre 1990
- (BEZI-87) BEZIVIN J.
Simulation et langages orientés objets
Journées L.O.O. BREST Nov 84 BIGRE+GLOBULE N°41 Pp 194-211
- (BIES-88) BIESELAAR J., LE GALL A., ROUBELLAT F., SIMONET G.
Ordonnancement en temps réel d'ateliers : une méthode d'aide à la
décision et sa mise en oeuvre.
Grenoble 1988 Congrès AFCET automatique
- (BOUV-86) BOUVIER
Société CIGEL (Distribution produit COPICS)
Présentation MRP & MRP II ADIRA 86
- (CAVA-87) CAVAILLE J.B., PROTH J.M.
SIPRODIS - Pratique de la simulation en production discontinue
Collection NOVOTIQUE EC2 1987
- (COHE-83) COHEN G., DUBOIS D., QUADRAT J.P., VIOT M.

Analyse du comportement périodique de systèmes de production par la théorie des dioïdes

Rapport de recherche INRIA n° 191 1983

(CONE-90) CONESA P., CAZALET M.

La simulation à l'appui d'une démarche d'automatisation de cellule de fabrication flexible.

Revue Automatique Productique Appliquée Vol 3 N° 1 1990

(DALL-83) DALLERY Y., DENEUX H., DAVID R.

Recherche d'une même base de description en vue de la simulation et de la commande d'un atelier flexible.

Utilisation du GRAFCET. Actes Congrès Automatique AFCET Besançon, France Nov 1983

(DANI-85) DANIERE

L'ordonnancement et sa place dans la gestion de production

Revue ADIRA INFORMATIQUE n° 75 Rhône Alpes Spécial GPAO, Mai Juin 1985

(DOUM-84) DOUMEINGTS G.

Méthode GRAI : méthode de conception des systèmes en productique.

Thèse d'état, Université de Bordeaux I, Novembre 1984

(DUBO-86) DUBOIS D., BEL G., FARRENY H., PRADE H.

Vers l'emploi de systèmes experts flous pour le pilotage de systèmes manufacturiers

Point en productique Vol n° 1. TEC & DOC LAVOISIER 1986

(DUFF-87) DUFFIE N.A., PIPER R.S.

Non Hierarchical control of flexible manufacturing cell

Robotic and computer integrated Manufacturing Vol 3 N° 2 pp 175-179 1987

(DUMA-74) DUMAS P.

Méthode d'ordonnancement paramétrique d'un atelier

Thèse de Docteur Ingénieur RAPPORT 026 ENSTA 1974

(ERSC- a) ERSCHLER J., LEVEQUE D., ROUBELLAT F.

Periodic Loading of flexible Manufacturing Systems
Document Interne LAAS

(GALA-84) GALACSI

Les systèmes d'information. Analyse et conception
Editions DUNOD Informatique 1984

(GARC-85) GARCIA H. MUTEL B. PROTH J.M.

Familles de produits et îlots de fabrication : le cas de machines multiples.

Rapport INRIA N° 469 Décembre 1985

(GARC-86) GARCIA H., MUTEL B., PROTH J.M.

Classification technique de données techniques

Rapport INRIA N° 545 Juillet 1986

(GIRA-82) GIRARD B., PONCET D.

L'atelier automatisé flexible de Citroën MEUDON

Annales des Mines - Mai, Juin 1982

(HAMM-87) HAMMER H.

Flexible Manufacturing Cells And Systems With Computer Intelligence.

Robotics & Computer-Integrated Manufacturing

Vol. 3, N°1, Pp 39-54, 1987

(HART-87) HARTMANN C.

Une approche utilisant une simulation en boucle fermée pour améliorer les performances d'un ordonnancement d'atelier.

Thèse Docteur Ingénieur ENSEEIHT - LAAS CNRS SAAS 87353 15

Décembre 1987

(HERI-86) HERITIER C.

Rapport de D.E.A. "Informatique et automatique"

INSA LYON 1986

(HERI-88) HERITIER C., PIERREVAL H.

Apport de la simulation à la conception d'un système de transport par chariots filoguidés.

Revue Automatique Productique Appliquée Vol 1 N° 1 1988

(HERI-91) HERITIER C.

Conception de système de production : une méthode d'aide à la décision basée sur la simulation et l'analyse de données.

Thèse INSA LYON 1991

(HITZ-79) HITZ K.L.

Scheduling Of Flexible Flow Shop

M.I.T. Report LIDS-R-879 MIT Cambridge Massachusset

Laboratory For information and Decision Systems Mars 1979

(HOLL-87) HOLLINGER D.

Les langages Orientés Objets en spécification et simulation de systèmes productiques.

SGN. Actes Colloque SIPRODIS 2-3 juin 87

(HOLS-86) HOLSAPPLE C.W., WHINSTON A.B.

GURU, l'utilisation des systèmes experts dans l'entreprise

1986 - Les éditions d'organisation

(IDEF-81) Report UM 110231200 NASA

June 1981

(JENS-81) JENSEN K.

Colored Petri Nets and the invariant method.

Theoretical Computer Science N°14 1981 Pp 317-336

(KAZA-85) KIRAKOS KAZANTZIDIS

Les Systèmes experts et la gestion de la production

Thèse de Docteur Ingénieur En informatique des organisations

Paris IX DAUPHINE 1985

(LOOV-86) VAN LOOVEREN A.J., GELDERS L.F., VAN WASSENHOVE L.N.

A Review of FMS planning Models

Modelling and design flexible Manufacturing Systems

Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam 1986

(LOZI-88) LOZINSKI C., ROGER GLASSEY C.

Bottleneck Starvation Indicators For Shop Floor Control.

IEEE Transactions on semiconductor Manufacturing Vol. 1 N°4
Novembre 1988

(MART-87) MARTIN F.

Un simulateur adapté à la complexité des systèmes de production.
Utilisation des réseaux de PETRI colorés.
Présentation interne L.A.G. (U.A. CNRS 228) ENSIEG-INPG 1987

(MERC-84) MERCEREAU M.A.

Cours "Maintenance"
Université Claude Bernard LYON I Licence de productique 83-84

(MEJT-85) MEJTSKY G.J., RAHNEJAT H

Introducing GPSL : A flexible manufacturing simulator
Computer Aided Design. Vol 17 N° 5 June 1985

(MONT-85) MONTEIL D.

SAGA : Simulation et aide à la gestion d'ateliers
Thèse, LAAS INSA de TOULOUSE 1985

(MULL-72) MULLER Y.

Applications pratiques des graphes à la recherche d'un optimum.
Editions EYROLLES 1972

(NIED-88) NIEDERHAUSEN H.P.

Real-time expert system for dynamic sequencing of flexible
manufacturing cells
TECHNISCHE MITTEILUNGEN KRUPP 1988

(NURS-88) NURSE O.A., CHRYSTALL C.N.

Using simulation and expert systems for the real time control of
a flexible manufacturing cell at IBM Havant.
IFS SIMULATION IN MANUFACTURING
4° International conference Novembre 1988

(NUSS-86) NUSSBAUMER H.

Informatique industrielle (Tomes I et II)
Presses Polytechniques romandes - Lausanne SUISSE 1986

(PIER-87) PIERREVAL H.

Analyse, modélisation et simulation des systèmes de production
Thèse de doctorat Université Claude Bernard LYON I 1987

(PIER-90) PIERREVAL H., RALAMBONDRAINY H.

A simulation and learning technique for generating knowledge
about manufacturing systems behavior.
J. Opl. Res. Soc. Vol 41, N° 6 1990

(PORT-87) PORTMANN M.C.

Méthodes de décomposition spatiales et temporelles en
ordonnancement de la production
2° Conf. Inter. SYSTEMES DE PRODUCTION 6-10 Avril 1987 PARIS
FRANCE

(RAMS-89) RAMSES

Documentation technique interface DNC - RAM 3000
1989

(ROY -70) ROY B.

Algèbre moderne et Théorie des Graphes
Tome 2 (Dunod Paris 1970)

(SAGU-84) SAGUEZ C.

QNAP2- Les techniques de modélisation et de simulation pour les
systèmes de production
"Quelques aspects de l'I.A.O."
Bulletin de liaison de l'INRIA n°98 Rocquencourt France Décembre
1984

(SAUV-87) SAUVE B.

Contribution de l'intelligence artificielle à la modélisation et
la simulation de processus discontinus
Centre de recherche CGE Marcoussis. Actes Colloque SIPRODIS 2-3
juin 87

(SCHA-86) SCHAAL F.

Pour un Projet GPAO : guide de l'utilisateur

AFNOR 1986 ISBN 2124875116

(SIPA-87) SIPA

Documentation technique et commerciale GRAI PRODUCTIQUE S.A. 1987

(SPRI-87) SPRINGER Cox

Interactive graphics in GPSS/PC

Simulation N° 49/3 pp 117-122 Septembre 1987

(TECH-88) TECHLOG

Documentation technique et commerciale SEDRIC

(VOYI-87) VOYIATZIS KONSTANTINOS

Utilisation de l'Intelligence artificielle pour les problèmes d'ordonnancement

Thèse Recherche Opérationnelle Paris IX DAUPHINE Janvier 1987 UER mathématiques de la décision

(WARN-86) WARNECKE H.J. ROTH H.P. SCHULER J.

F.M.S. Applications in Germany - Objectives and constraints.

In modelling and design of F.M.S. ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS Ed.

KUSIAK A. AMSTERDAM 1986.

(WEKA-87) M. BAGLIN, A. GARREAU, M. GRIEF, L. MAEDER

Gestion informatique de la production et des ressources

Edition WEKA gestion Partie 8 Chapitre 8;1 : Méthode OPT, 1987

(WU -88) WU S-Y.D., WYSK R.A.

Multi-pass Expert Control System - A Control/Scheduling Structure for Flexible Manufacturing Cells

Journal of manufacturing Systems Vol 7 N° 2 pp 107-120 1988

GLOSSAIRE

Système discret : un système discret, par opposition à continu, est un système physique dont les variables d'état prennent des valeurs incluses dans un ensemble fini de valeurs.

Il ne faut pas confondre système discret et système discrétisé. Ce dernier est décrit par des variables d'état régies par des fonctions continues. Ces fonctions continues ont été discrétisées pour des raisons de numérisation des processus de conduite.

Attribut : les attributs d'un objet sont un ensemble de variables décrivant cet objet. Deux types d'attributs existent. Les attributs fixes, relatifs à la description de l'objet, et les attributs variables, relatifs à l'état instantané de notre objet.

Le tableau suivant présente des exemples d'attributs dans les domaines continu et discret.

Type d'attribut	Système continu	Système discret
Fixe	capacité nominale d'une cuve	dimension maximum d'une file d'attente
Variable	Contenance à un instant 't' de la cuve	Nombre de pièces présentes à un instant 't' dans la file

Logique de changement d'état : c'est l'ensemble des règles qui indiquent sous quelles conditions les attributs variables changent de valeur.

Autonomie : (Cybernétique) propriété de certains systèmes complexes, de ne pas refléter passivement les variations de leur environnement, l'autonomie paraît liée à l'existence de structures cybernétiques. On ne conçoit sa manifestation que par un comportement finalisé, c'est à dire par une action

vers un but. Un organisme comporte deux moyens de manifester son indépendance : l'un, général, est la modification de son mécanisme interne de réponse aux messages de son environnement, c'est le comportement instinctif; l'autre est la mémoire lorsqu'elle est source d'imagination, c'est à dire génératrice de stratégie. On distingue l'autonomie, surtout motrice, de l'indépendance, qui associe conscience réfléchie et autonomie. Au delà, il y a la licence, qui bloque les informations de l'environnement, la liberté, qui intègre ces informations, et la décision, qui est l'exercice de la liberté aux niveaux à partir desquels la logique est impuissante. (encyclopédie LAROUSSE)

Heuristique : qualifie tout ce qui sert à la découverte, à l'invention, et la recherche. Un hypothèse heuristique est une hypothèse de travail. On l'utilise provisoirement pour sa fécondité sans se soucier de sa vérité ou de sa fausseté intrinsèque. (Encyclopédia Universalis)

Système temps réel : un système fonctionne en temps réel lorsqu'il est capable d'absorber toutes les informations d'entrées sans qu'elles soient trop vieilles pour l'intérêt qu'elles présentent, et par ailleurs, de réagir à celles-ci suffisamment vite pour que cette réaction ait un sens (ABRIAL-BOURGNE).

Décision temps réelle : par référence à un système temps réel, une décision rdy dite "en temps réelle" si elle est établie et appliquée dans un intervalle de temps donné, sans dégrader les performances du système qui subit les effets de cette décision.

Flexibilité : caractérise un système de production qui peut s'adapter aisément et rapidement à des variations de production.

Critère : caractère décisif de la vérité.

Prospective : Adj. Qui regarde l'avenir.

n.f. (1920) Science qui a pour objet l'étude des causes techniques, scientifiques, économiques et sociales qui accélèrent l'évolution du monde, et la prévision des situations qui en découlent.

Ressource : partie d'un système pouvant être employée par différents utilisateurs.

Flux : progression d'une masse d'être en mouvement.

Ressource préemptible: ressource pouvant être interrompue dans son activité pour traiter une activité plus prioritaire.

Ressource critique: ressource non partageable entre plusieurs utilisateurs.

Résumé : Le rôle d'une gestion en temps réel des fonctions annexes de production (ex : transports, outils...) est essentiel dans le cadre d'une cellule flexible.

Lors d'une analyse de type GRAI, distinguant composantes physiques, informationnelles et décisionnelles, nous proposons trois modes d'allocation d'une ressource de transport. Soit par classe de déplacements, soit par application de règles de gestion, soit, finalement, par ordonnancement local de l'ensemble instantané des déplacements à l'aide d'une méthode de Séparation et Evaluation Progressive (SEP).

L'application de nos méthodes nous a permis d'étendre les fonctionnalités d'un produit industriel de simulation par événements discrets, SIMULFLEX, logiciel dédié aux cellules flexibles de production. En particulier, nous lui avons adjoint le choix de règles de gestion pour les ressources de stockage, de fabrication et de transport.

Finalement, la validation des modes d'allocation a fait l'objet d'une étude des résultats de simulation à l'aide d'une méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP). A partir d'un cas réel d'une cellule de polissage du verre, nous avons testé différentes politiques de gestion. Ainsi, nous mettons en évidence l'incidence des choix de gestion sur les performances du système de production.

Ces travaux, menés dans le cadre d'une collaboration industrielle, étendent les démarches méthodologiques en matière de simulation puis de pilotage de cellules flexibles de production.